

## RESUMEN

En aplicaciones como la conformación en frío donde las herramientas están sometidas a diversas cargas, se usan materiales para herramientas como aceros rápidos y metales duros recubiertos con distintos recubrimientos. Además de la adhesión, la abrasión y la tribo-oxidación, los sucesivos impactos por contacto de Hertz inducen presiones que causan el fallo por fatiga. Por ello, es necesario establecer las condiciones límite de trabajo de los materiales para optimizar la vida útil de las herramientas.

El objetivo de este estudio es evaluar el comportamiento de tres sustrato distintos: DIN 1.2379, UNIVERSAL y HWS recubierto con una película de TiN bajo contacto esférico monotónico y cíclico.

Los ensayos monotónicos se realizan mediante indentadores de distintos diámetros y dentro de un rango de carga. Por otra parte, el ensayo de fatiga se realiza con un indentador determinado, en un rango de carga y aumentando el número de ciclos. Estos ensayos van acompañados de un análisis microscópico de los daños generados tanto en la superficie como en profundidad.

Los resultados obtenidos permiten caracterizar la deformación en el régimen elástico y plástico y demuestran que 1) la respuesta mecánica al contacto, obtenida mediante indentación esférica bajo sollicitación mecánica, es muy similar para todos los sistemas sustrato-recubrimiento estudiados. Por lo tanto la presencia del recubrimiento no afecta a la respuesta al contacto del sustrato como ente individual, 2) la cedencia plástica de los tres sistemas sustrato-recubrimiento estudiados es un requisito indispensable para la aparición de grietas circulares en el recubrimiento, 3) la aplicación de una carga cíclica por indentación ha permitido discernir las diferentes respuestas mecánicas en los sistemas sustrato-recubrimiento, 4) la sensibilidad a fatiga es relativamente baja para los sistemas evaluados, lo cual puede atribuirse al carácter cerámico del TiN y 5) el acero HWS mostró mejor respuesta mecánica teniendo en cuenta que el recubrimiento fue el mismo.





# SUMARIO

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO	6
<b>2. ACEROS DE HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO</b>	<b>8</b>
2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS	8
2.1.1. DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	8
2.1.2. RESISTENCIA AL DESGASTE	9
2.1.3. TENACIDAD	9
2.2. FABRICACIÓN DE LOS ACEROS PARA TRABAJO EN FRÍO	10
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN FRÍO	11
2.3.1. ACERO DIN 1.2379	11
2.3.2. ACERO UNIVERSAL	12
2.3.3. ACERO HWS	13
<b>3. RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS EN FASE VAPOR</b>	<b>16</b>
3.1. APLICACIONES	17
3.2. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR	18
3.2.1. EVAPORACIÓN TÉRMICA EN VACÍO	19
3.2.2. EVAPORACIÓN POR HAZ DE ELECTRONES	19
3.2.3. EVAPORACIÓN POR ARCO CATÓDICO	20
3.3. RECUBRIMIENTOS TIN	21
<b>4. ACEROS RECUBIERTOS</b>	<b>25</b>
4.1. ENSAYOS DE IMPACTO Y DE FATIGA EN SISTEMAS RECUBIERTOS	25
4.1.1. TEORÍA DE HERTZ	25
4.1.2. FRACTURA CÓNICA DE HERTZ	26
4.1.3. DAÑO CUASI-PLÁSTICO	27
4.1.4. FATIGA POR CONTACTO	28
<b>5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>30</b>
5.1. MATERIAL EMPLEADO	30
5.1.1. PROCESO DE DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO	30
5.2. DUREZA DEL SUSTRATO	30



5.3.	INDENTACIÓN ESFÉRICA MONOTÓNICA .....	32
5.3.1.	ENSAYO SOBRE LOS SISTEMAS RECUBIERTOS.....	32
5.3.2.	ENSAYO SOBRE LOS SUSTRATOS .....	34
5.4.	FATIGA POR CONTACTO ESFÉRICO.....	34
5.4.1.	ENSAYO SOBRE LOS SISTEMAS RECUBIERTOS.....	34
5.5.	EVALUACIÓN DE MODOS DE DAÑO .....	35
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>38</b>
6.1.	INDENTACIÓN ESFÉRICA MONOTÓNICA .....	38
6.2.	CRITERIO DE DAÑO .....	41
6.3.	FATIGA POR CONTACTO ESFÉRICO.....	46
6.4.	ANÁLISIS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....	58
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>8.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>63</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>.....</b>	<b>69</b>
A	PRESUPUESTO.....	69
B	ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL .....	73





# 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los aceros para trabajo en frío son ampliamente utilizados para la fabricación de herramientas que están sometidas a grandes esfuerzos de manera repetitiva. Por ello, dichos aceros deben exhibir elevados valores de tenacidad y resistencia que permitan aumentar la vida útil de las herramientas.

El estudio de sistemas recubiertos ha nacido por la necesidad de mejorar las propiedades de los aceros para trabajo en frío, consiguiendo con dichos recubrimientos una mayor protección de las herramientas a la corrosión y al desgaste, a la vez que se alcanza un aumento significativo de la vida útil de las mismas.

Desde el punto de vista de los estados tensionales, cabe destacar que las cargas concentradas por contacto en los componentes de conformado generan tensiones locales que pueden alcanzar valores muy elevados para cargas aplicadas relativamente bajas. Por lo tanto, uno de los mecanismos de fallo en las herramientas es la fatiga por contacto.

La caracterización mecánica de materiales bajo solicitaciones de contacto no es directa y, generalmente, requiere de ensayos no normalizados. En este sentido, la simplicidad experimental y el pequeño volumen de la muestra hacen del ensayo de Hertz una alternativa adecuada para simular solicitaciones mecánicas reales [1].

Las principales ideas sobre la fatiga por contacto sobre sistemas recubiertos se plantean en el contexto de identificar diferentes modos de daño en términos de deformaciones cuasi-plásticas en el sustrato y fracturas frágiles en el recubrimiento, establecer un fallo adhesivo como criterio de daño del sistema y analizar la fatiga por contacto en términos de carga.

Así, en este estudio se realizan diversos ensayos de impacto esférico y de fatiga sobre la superficie recubierta y la sección transversal, para determinar la respuesta mecánica de tres sustratos de acero recubiertos con TiN bajo solicitaciones monotónicas y cíclicas.

## 1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la respuesta mecánica y los modos de daño inducidos por contacto esférico sobre tres aceros distintos, todos ellos recubiertos con la misma capa dura cerámica, TiN. El estudio se centra en analizar la influencia de dichos sustratos en el comportamiento de los sistemas a través de un análisis en términos de presión, con el fin de determinar las diferentes respuestas mecánicas de cada sistema evaluado.





## **2. ACEROS DE HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO**

Actualmente, las técnicas de conformado en frío tienen una importancia fundamental en las tecnologías de producción. Las herramientas son los elementos sometidos a mayores esfuerzos mecánicos esperándose de ellas una duración o vida útil lo más larga posible.

Los aceros para trabajos en frío representan uno de los productos de mayor compromiso en su fabricación y posterior transformación en útiles y herramientas. Entre las exigencias que tienen que satisfacer se destaca la facilidad de mecanizado, la ausencia de defectos, altas prestaciones de tenacidad, buena resistencia a la compresión, al desgaste y a la fatiga.

Los aceros aleados para la fabricación de herramientas son materiales de un alto grado de calidad que condicionan los procesos de fabricación. En estos procesos, los principales problemas en el diseño que presentan es que las herramientas sean suficientemente duras y resistentes a la compresión, que tengan la suficiente tenacidad para que puedan soportar las condiciones de trabajo a las que están sometidas y que su vida útil sea lo más larga posible.

En la práctica, la selección de un acero de herramienta para trabajos en frío debe correlacionar las características metalúrgicas del acero con los principios básicos de utilización propios de la herramienta: dureza y resistencia a la compresión, resistencia al desgaste y tenacidad.

### **2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS**

#### **2.1.1. DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

La dureza en el acero de herramienta es propia de la martensita de temple y está influenciada por unas partículas duras depositadas en la masa del acero en la matriz martensítica denominadas carburos. Estos carburos son sustancias muy duras presentes en la masa del acero en forma de inclusiones. Mediante la adición de elementos tales como el cromo, molibdeno, vanadio, wolframio, titanio, etc. el carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) se transforma en otros carburos de dureza superior. El grado de dureza depende de la naturaleza propia de cada uno de los carburos presentes en el acero.

La dureza más apropiada de utilización y necesaria para el buen uso de las herramientas es aquella en que las herramientas no sufran deformaciones permanentes, ni se rompan bajo





solicitaciones y esfuerzos cíclicos a los que están sometidos en servicio. Dichas solicitaciones deben estar por debajo del límite de fluencia para que sólo se produzcan deformaciones reversibles en la herramienta afectada.

La resistencia a la compresión y la dureza siempre se hallan en una estrecha relación, por lo que elevando la dureza se aumenta, asimismo, el límite de fluencia del material y, por tanto, su resistencia a la compresión.

La consistencia de las herramientas se caracteriza por la conservación de sus partes activas en servicio en buen estado durante el mayor tiempo posible y, a su vez, ralentizando la degradación que sufre por el constante desgaste progresivo al que está sometida. La carga de compresión depende, en la práctica, de la dureza del acero. Dicha dureza puede ajustarse mediante el tratamiento térmico de temple y revenido. Cuando la carga de compresión en una herramienta es superior al límite de fluencia del acero con el que está fabricada, se produce en ella una deformación plástica.

### **2.1.2. RESISTENCIA AL DESGASTE**

La influencia de la resistencia al desgaste depende de la cantidad de carburos presentes en la estructura del acero de herramienta y de su dureza de uso después de templada y revenida. El desgaste es un fenómeno consecutivo a la fricción en seco entre la herramienta y el material trabajado. Este desgaste se manifiesta como una degradación superficial de las partes activas de los útiles.

Hay dos tipos de mecanismos de desgaste; por adhesión y por abrasión. El desgaste por adhesión es un mecanismo de fricción entre dos superficies de contacto que acaba en la soldadura local o gripado, con la rotura de las uniones de fricción y desprendimiento de partículas de la superficie menos dura. El desgaste por abrasión es un proceso constante en el tiempo y unido a un gradual arranque y desprendimiento de partículas duras que pueden ser de los abrasivos que contiene el material a conformar o de partículas de origen adhesivo.

La resistencia al desgaste durante el trabajo en frío de los metales depende de la cantidad de carburos presentes en la estructura del acero, después del temple y revenido. En consecuencia, para incrementar la resistencia al desgaste de las herramientas hay que temprarlas a la máxima dureza teniendo en cuenta el tamaño, naturaleza y forma de los carburos. También el efecto combinado de la dureza y los elementos de aleación contribuyen al aumento de la resistencia al desgaste.

### **2.1.3. TENACIDAD**

La tenacidad es la capacidad que tiene la herramienta para contrarrestar el peligro de rotura en servicio. Por tanto, la herramienta no debe variar de forma ni de dimensiones bajo los



esfuerzos aplicados en su trabajo. Esta precisión hace que las herramientas en estado tenaz tengan un límite elástico o de fluencia elevado.

El comportamiento de resistencia a la fractura de una herramienta requiere cierta plasticidad del acero que permita eliminar los puntos de tensión que se producen durante la construcción, mecanización o funcionamiento de la herramienta. Esta plasticidad es necesaria para que no se produzcan grietas.

La tenacidad depende de la estructura alcanzada por tratamiento térmico y de la composición química del acero utilizado. La tenacidad después del temple disminuye muy significativamente cuando existe un alto contenido de carbono y gran cantidad de carburos lo que implica una elevada dureza y resistencia al desgaste. Por lo tanto, se puede afirmar que la tenacidad es inversamente proporcional a la dureza y a la resistencia al desgaste. En consecuencia, en la elección del material de herramienta hay que encontrar el equilibrio entre estas propiedades.

## **2.2. FABRICACIÓN DE LOS ACEROS PARA TRABAJO EN FRÍO**

La fusión de los aceros aleados para herramientas se realiza habitualmente en hornos eléctricos. Los procesos actuales más utilizados en la elaboración de dichos aceros son Horno-Vacío-Cuchara (HVC), refusión en horno de arco al vacío (VAR) y refusión bajo escoria electroconductora (ESR). Estas técnicas han mejorado extraordinariamente la calidad de los aceros de herramientas desde el punto de vista del grado de desoxidación, contenido de oxígeno, limpieza de inclusiones, desulfuración, etc. Llegando a obtener un elevado grado de pureza y una gran homogeneidad estructural.

Una ruta alternativa es la pulvimetalurgia (PM), técnica mediante la cual se obtienen aceros con una mayor homogeneidad. Los aceros rápidos y demás aceros para trabajos en frío ledeburíticos son elaborados según este procedimiento. Los aceros pulvimetalúrgicos se caracterizan por una buena tenacidad, aptitud al rectificado y por una considerable estabilidad dimensional después del temple y revenido.

La pulvimetalurgia ofrece en los aceros así fabricados la solución a los problemas de distribución heterogénea de carburos que influyen desfavorablemente en la fabricación y utilización de las herramientas.



## 2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN FRÍO

Los aceros de herramientas para trabajo en frío pueden clasificarse en tres grupos principales.

El grupo I es el compuesto por los aceros de baja aleación, calificados como aceros resistentes al choque, tenaces, pero débilmente resistentes al desgaste. Su contenido en carbono oscila entre el 0,4 y 0,7 %. De manera que, a mayor carbono presenta durezas más elevadas. Dicha dureza no sobrepasa los 60 HRC.

El grupo II contiene los aceros de media aleación con un contenido de carbono comprendido entre 0,4 y 1 %. Los aceros de más alto carbono, después del temple y revenido, tienen menor tenacidad y mayor resistencia al desgaste que los aceros del grupo I. En cambio, los aceros de menor contenido de carbono son aceros utilizados universalmente para trabajos en caliente, pero también se emplean en la fabricación de ciertas herramientas para trabajos en frío que necesitan una elevada tenacidad, sacrificando sensiblemente su nivel de dureza y resistencia al desgaste.

Por último, el grupo III se compone de aceros ledeburíticos como los aceros al cromo y los aceros rápidos con contenido de carbono entre 0,85 y 1,30 %. Dichos materiales son de gran aleación y con carbonos significativamente elevados. Los aceros ledeburíticos alcanzan durezas de temple alrededor de los 63 y 65 HRC. Una vez templados y revenidos consiguen, además, una buena resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión y una moderada baja tenacidad [2].

Los aceros empleados en este proyecto como sustratos pertenecen al grupo III fabricados por dos rutas y proveedores distintos.

### 2.3.1. ACERO DIN 1.2379

El acero DIN 1.2379 se caracteriza por ser un acero ledeburítico al 12% de cromo aleado con vanadio y molibdeno. Sus principales propiedades mecánicas son la alta resistencia al desgaste, la excelente prestación al corte, una alta tenacidad y templabilidad.

Este tipo de acero puede ser nitrurado o se le puede aplicar un recubrimiento PVD después de un tratamiento térmico especial de endurecimiento secundario. También es un acero apropiado para el temple al vacío.

Al ser un acero de corte de alto rendimiento y estable dimensionalmente se usa para cortes sensibles a la rotura, sierras de metal, estampas, cuchillas de corte, matrices desbarbadotas,



herramientas para el laminado de roscar, para extrusión en frío, para trabajar la madera, cortantes circulares, herramientas de corte preciso, etc.

### 2.3.2. ACERO UNIVERSAL

El UNIVERSAL es un acero desarrollado por la empresa ROVALMA para la conformación de materiales de última generación que han aparecido en la industria del automóvil, como los aceros de alta resistencia.

El principal compromiso para hacer frente a las solicitudes de estos nuevos materiales es incrementar la resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo, la tenacidad y la dureza, todo ello sin que el coste del nuevo acero sea superior a los convencionalmente empleados, dentro de los de buena calidad.

Este acero se utiliza en aplicaciones en las que se requiere una elevada resistencia al desgaste abrasivo con alta tenacidad y moderada resistencia mecánica, por ejemplo en embutición y corte de chapas finas.

Los valores de resistencia al desgaste, la tenacidad y la dureza han sido superados si se compara con los aceros de uso habitual, siendo la resistencia al desgaste la que más se ha potenciado en este nuevo acero. En la Tabla 2.1 se muestran algunas características físicas y mecánicas del UNIVERSAL.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	
Conductividad calorífica	26 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Calor específico	460 J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Densidad	7.78·10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup>
Módulo de Elasticidad	218 GPa
Dureza	58 – 64 HRC
Charpy sin entalla [10x10x55] {64 HRC}	51 J

Tabla 2.1. Propiedades del acero UNIVERSAL [Fuente: ROVALMA].

Las mejoras que presenta este acero con respecto al DIN 1.2379 son una mayor dureza, una mayor resistencia al desgaste tanto abrasivo como adhesivo y resiliencia longitudinal, es decir, la capacidad del material para absorber energía al deformarse [3].



### 2.3.3. ACERO HWS

El HWS es un acero pulvimetalúrgico, es decir, conformado mediante pulvimetalurgia que permite fabricar piezas de alta aleación libres de macro segregaciones advirtiéndose en ellos un incremento de la resistencia al desgaste, al mismo tiempo que una mejor tenacidad. Por tanto, es un acero con resistencia al desgaste, dureza y, particularmente, tenacidad. Este acero combina resistencia a la abrasión con resiliencia a los más altos valores dentro de un mismo acero.

Como es habitual, los aceros de máxima resistencia al desgaste abrasivo, carecen de tenacidad, mientras que en los aceros de alta tenacidad, su resistencia al desgaste abrasivo es pobre. De igual forma, la dureza acostumbra a presentar una relación proporcional inversa con la tenacidad. Con el HWS se ha buscado un acero que combina simultáneamente las tres propiedades a los más altos niveles.

El HWS isotrópico puede cubrir las exigencias necesarias para conformar geometrías más complejas y, sobretodo, de la generación en el uso de chapas y perfiles de aceros de alta tecnología. El objetivo del HWS es producir un acero, que sin ser más caro que los usualmente utilizados, mejore ostensiblemente la relación resistencia al desgaste abrasivo-dureza-tenacidad, con especial hincapié en esta última propiedad.

Este acero también se caracteriza por la estabilidad dimensional a través del tratamiento térmico temple-revenido. Las excelentes propiedades obtenidas con el HWS le han convertido en el acero óptimo para muchas más aplicaciones de las previstas originalmente. Dichas propiedades pueden observarse en la Tabla 2.2.

Al comparar el HWS con los otros dos aceros nombrados anteriormente, se puede determinar que éste presenta una dureza similar a la del UNIVERSAL, pero en cambio, muestra una resiliencia considerablemente mayor que la presentada por el DIN 1.2379 y el UNIVERSAL. En cuanto al desgaste, muestra una resistencia al desgaste adhesivo un poco inferior a la del UNIVERSAL, pero superior a la del DIN 1.2379. En cambio, la resistencia al desgaste abrasivo es inferior a la que presentan los otros dos aceros [4].



<b>PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS</b>	
Conductividad calorífica	$26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Calor específico	$460 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Densidad	$7.78\cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Módulo de Elasticidad	218 GPa
Dureza	58 – 64 HRC
Charpy sin entalla [7x10x55] {63 HRC}	50 J

Tabla 2.2. Propiedades del acero HWS [Fuente: ROVALMA].





### 3. RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS EN FASE VAPOR

La aplicación de recubrimientos en herramientas de conformado representa una alternativa para mejorar las propiedades mecánicas y prolongar la vida en servicio de dichos componentes.

Los parámetros de deposición (temperatura del sustrato, características del plasma, tiempo de ataque, etc.) y las características del sustrato (composición, microestructura, topografía) determinan las características del recubrimiento (espesor, composición química, microestructura y topografía), por otra parte, la composición y microestructura del sustrato y del recubrimiento definen sus respectivas propiedades térmicas, químicas y mecánicas de modo que todo el conjunto de propiedades del sustrato y del recubrimiento establece las propiedades tribomécánicas del sistema, es decir, las propiedades de fricción y la resistencia contra el daño superficial ocasionado por deformación, abrasión, erosión, impacto repetitivo...

El sustrato gobierna la nucleación y el crecimiento del recubrimiento de manera que la preparación superficial del sustrato juega un papel muy importante en la adhesión sustrato – recubrimiento y en la topografía del recubrimiento, la cual, a su vez, se reflejará en el acabado superficial de la pieza.

La función del recubrimiento en servicio depende en gran medida de los siguientes parámetros [5]:

- La adhesión sustrato – recubrimiento es un parámetro vital en muchas aplicaciones de componentes recubiertos. Los ensayos de adhesión originan un campo externo de tensiones en la intercara que provoca el fallo de la cohesión. Dicho campo depende de la geometría, del modo de carga y de los parámetros elásticos y plásticos del sustrato y del recubrimiento, lo que provoca que el valor de adhesión adquirido es sólo representativo del ensayo particular al que ha sido sometido, es decir, la relación entre los parámetros involucrados es tan complicada que no hay una teoría general que puede prevenir el fallo de la adhesión en una situación real.
- El módulo de Young del recubrimiento es un parámetro necesario para calcular sus tensiones residuales y evaluar su comportamiento de fisuración y/o delaminación. Asimismo, la dureza se utiliza para valorar la calidad del recubrimiento y prever su comportamiento en diferentes aplicaciones. En el caso del desgaste abrasivo entre dos sólidos, la resistencia al desgaste y al impacto está relacionada con la dureza si





los abrasivos o la superficie abrasiva son más duros que la superficie que se está desgastando. Durante las últimas décadas, la nanoindentación se ha convertido en la técnica predominante para obtener propiedades mecánicas intrínsecas de recubrimientos. La dureza y el módulo de Young se obtienen mediante las curvas carga/desplazamiento usando diferentes enfoques teóricos, como propusieron Oliver y Pharr [6].

- Los recubrimientos obtenidos por PVD presentan tensiones residuales debidas a anomalías en la nucleación y crecimientos y al bombardeo de iones durante el crecimiento. Asimismo, la diferencia del coeficiente de expansión térmica entre el sustrato y el recubrimiento y las posibles transformaciones de expansión de fase durante la etapa de enfriamiento dan lugar a tensiones residuales.

La delaminación del recubrimiento puede estar provocada por tensiones residuales compresivas demasiado altas o por cargas exteriores. La geometría y la topografía de la intercara sustrato – recubrimiento tienen una gran influencia sobre la resistencia a la delaminación del recubrimiento. Si la superficie del sustrato es lisa, el riesgo de delaminación es menor que el caso de superficie rugosa ya que, en este último caso, las tensiones normales y de cizalla generadas en la intercara por las tensiones residuales en el recubrimiento pueden ser muy elevadas.

- La fisuración del recubrimiento suele preceder al daño de los recubrimientos por PVD. La capacidad del sistema sustrato – recubrimiento de absorber deformación a tracción o compresión sin nucleación y propagación de grietas es crucial. La fisuración se produce por tensiones de tracción de modo que las tensiones residuales a compresión en el recubrimiento tienen que ser previamente relajadas.

### 3.1. APLICACIONES

Los componentes recubiertos se utilizan básicamente para herramientas de corte y de conformado. En el campo de las herramientas de corte, donde el tamaño de los componentes es bastante pequeño debido a que la deposición del recubrimiento permite mantener bajos los costes de dicha operación.

La aplicación de recubrimientos tribológicos en herramientas de conformado está todavía en sus inicios, pero tiene un enorme potencial. Las herramientas para conformado forman parte de un gran número de sectores de la industria, de manera que existen muchas razones para usar dichos recubrimientos en estas aplicaciones. Muchas herramientas son demasiado grandes para ser tratadas desde el punto de vista económico mediante los procesos de recubrimiento actuales. Además, los materiales del sustrato de la mayoría de las



herramientas de conformado no pueden resistir las temperaturas de deposición actualmente usadas. Estos componentes a menudo han complicado el recubrimiento de secciones estrechas al ser difícil, hasta casi imposible, de realizar. Finalmente, a menudo el alto coste de las herramientas restringe su uso en la aplicación de recubrimientos nuevos aún sin explorar. Actualmente, se están evaluando los procesos PVD asistidos por plasma como una solución técnica prometedora [5].

### 3.2. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR

Las técnicas de PVD (Physical Vapor Deposition) consisten en la formación de un vapor del material a depositar. Se parte directamente del material sólido que se pretende depositar para convertirlo en un vapor mediante su calentamiento o su bombardeo con iones energéticos. El vapor formado se condensa sobre la superficie del sustrato formando una capa delgada. El proceso se realiza en la cámara del reactor con un grado de vacío del orden de  $10^{-5}$  mbar o en atmósfera controlada para evitar la interacción del vapor con el aire. Es preferible que el sustrato se mantenga a temperatura para incrementar los valores de adherencia. El proceso puede ser asistido por plasma para aumentar la velocidad de crecimiento y mejorar las propiedades de la capa. El equipo utilizado en este proceso se ilustra en la Figura 3.1.

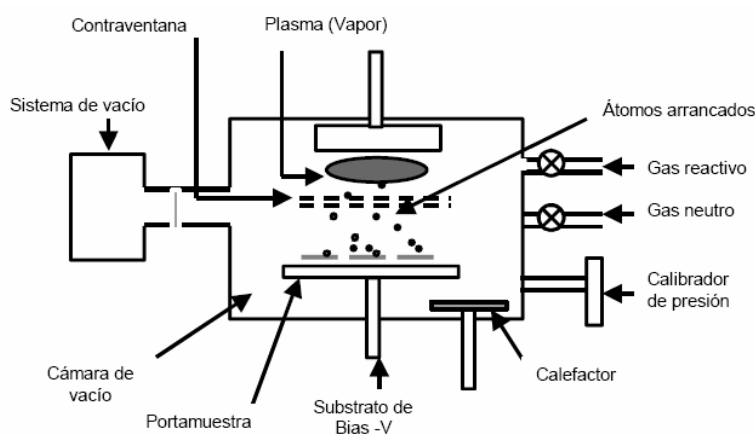


Figura 3.1. Esquema general de un equipo PVD [7]

Las aplicaciones de los recubrimientos obtenidos por PVD engloban los recubrimientos denominados técnicos o funcionales (para mejorar la resistencia al desgaste abrasivo), tribológicos (mejora de los coeficientes de fricción y desgaste adhesivo) y decorativos (mejora de la resistencia a la corrosión, abrasión y estética).



Uno de los fenómenos que tiene lugar en la deposición PVD es la aparición de microgotas del metal depositado debido a éste no se ioniza por completo y se deposita en forma de microgotas.

Generalmente, las diferentes técnicas de formación de vapor en un equipo PVD pueden ser agrupadas en la evaporación térmica en vacío, por haz de electrones y por arco catódico [7].

### **3.2.1. EVAPORACIÓN TÉRMICA EN VACÍO**

Esta técnica consiste en el calentamiento hasta la evaporación del material que se pretende depositar. El vapor del material termina condensándose en forma de lámina delgada sobre la superficie fría del sustrato y las paredes de la cámara de vacío. Normalmente la evaporación se hace a presiones reducidas con el objetivo de evitar la reacción del vapor con la atmósfera ambiente. A estas bajas presiones, el recorrido libre medio de los átomos de vapor es del orden de las dimensiones de la cámara de vacío por lo que estas partículas viajan en línea recta desde la fuente de evaporación hasta el sustrato. Al mismo tiempo, en las técnicas de evaporación térmica la energía media de llegada de los átomos de vapor a la superficie del sustrato suele ser baja lo cual puede afectar seriamente la morfología de las capas, resultando frecuentemente un material poroso y poco adherente.

### **3.2.2. EVAPORACIÓN POR HAZ DE ELECTRONES**

Esta técnica está basada en el calentamiento producido por el bombardeo de un haz de electrones de alta energía sobre el material a depositar. El haz de electrones es generado mediante un cañón de electrones, el cual utiliza la emisión termiónica de electrones producida por un filamento incandescente (cátodo). Los electrones emitidos, en forma de corriente eléctrica, son acelerados hacia un ánodo mediante una diferencia de potencial muy elevada. El ánodo puede ser el propio crisol o un disco perforado situado en sus proximidades. A menudo se incluye un campo magnético para curvar la trayectoria de los electrones, situando el cañón de electrones por debajo de la línea de evaporación. Todo esto se esquematiza en la Figura 3.2.



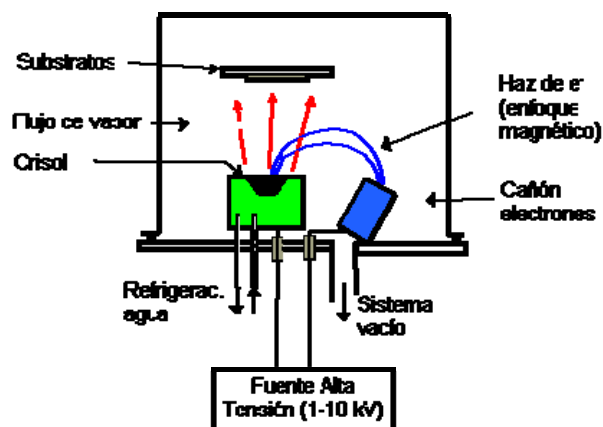


Figura 3.2. Esquema general del sistema de deposición por haz de electrones [Fuente: ICCM]

### 3.2.3. EVAPORACIÓN POR ARCO CATÓDICO

Este sistema basa la evaporación y obtención de los iones de metal, en el efecto que produce un arco voltaico de alto amperaje generado sobre la superficie de este material (cátodo). Los iones, son focalizados por un campo magnético, acelerados y proyectados sobre la pieza a recubrir por acción de una diferencia de potencial existente entre las piezas y la cámara del reactor. La energía cinética de los iones se transforma en calorífica al chocar contra la pieza y mantiene la temperatura durante la fase de recubrimiento. Los compuestos se forman al introducir, en la cámara, gases reactivos de distinta naturaleza a bajas presiones. Todo este proceso se realiza en un reactor PVD como el mostrado en la Figura 3.3.

La evaporación por arco catódico genera una gran densidad de iones lo que permite obtener espesores de capa considerables en tiempos cortos. Facilita la obtención de capas dopadas y multicapas para mejorar las propiedades de las capas simples convencionales.

Una elevada velocidad de ionización conduce a una alta energía de deposición y a la formación de una capa densa. Por el efecto del bombardeo iónico, los recubrimientos depositados también exhiben un elevado nivel de adhesión al sustrato. Durante este proceso, los iones metálicos pueden penetrar la red del sustrato a niveles de Ångström, induciendo cierta rugosidad a nivel atómico que puede ser la responsable de la buena adherencia del recubrimiento al sustrato [8].



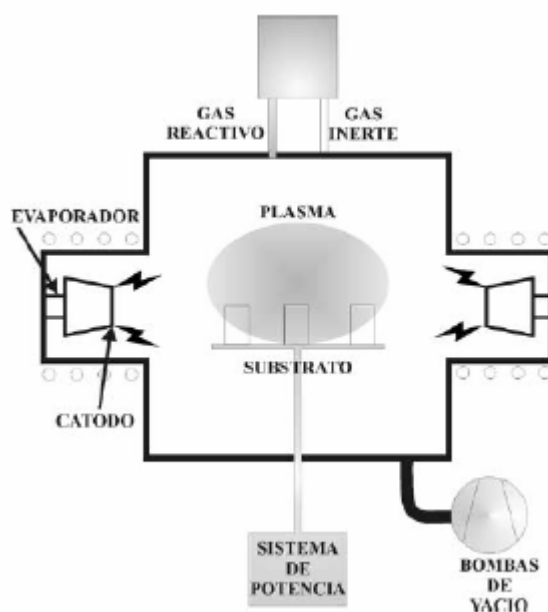


Figura 3.3. Esquema general del sistema de evaporación por arco catódico [8]

### 3.3. RECUBRIMIENTOS TiN

El Nitruro de Titanio (TiN) fue el primero cronológicamente en ser depositado. Se trata de una capa dura (2500 HV) de color dorado, ideal para atacar problemas de desgaste abrasivo o adhesivo en herramientas de mecanizado, punzones y matrices. El TiN es el recubrimiento que goza de mayor implantación industrial.

Este tipo de recubrimiento fue de los primeros desarrollados por proceso PVD. Gracias al TiN se obtienen capas duras finas para mejorar la dureza superficial y, por tanto, la resistencia al desgaste. Sin embargo, actualmente no sólo se valora su dureza, sino que además presenta distintos comportamientos tribológicos en interacción con los materiales antagonistas.

El TiN dispone de una estructura columnar, de manera que presenta dos regímenes de respuesta, uno predominado por el deslizamiento columnar a una tensión de cizalla crítica determinada por el esfuerzo residual en el recubrimiento, y el otro, por ser más perjudicial caracterizado por la fractura.

Al superar una carga crítica se comprueba que los recubrimientos se deforman por cizalla de dichos recubrimientos sobre el sustrato, como se puede observar en la Figura 3.4. Esto sugiere que las columnas se deslizan verticalmente por la acción de un esfuerzo de cizalla y



que no se produce el desplazamiento transversal de los límites de las columnas. Por tanto, la respuesta del compuesto es una combinación de un recubrimiento elástico que experimenta fisura cortante para una tensión crítica y un sustrato elasto-plástico como se muestra en la Figura 3.5. Tal deformación puede clasificarse como compatible ya que el recubrimiento y el sustrato se desplazan juntos hasta que conduce a la fractura del sustrato [9].

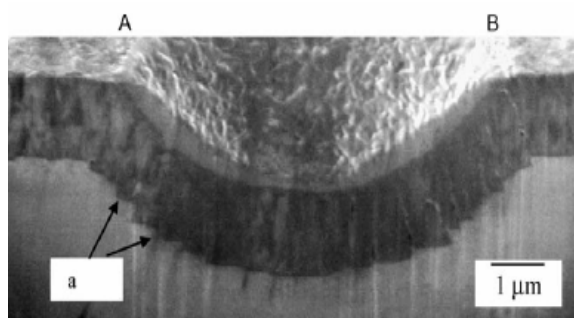


Figura 3.4. Imagen de la sección transversal mostrando el desplazamiento del recubrimiento sobre el sustrato [9]

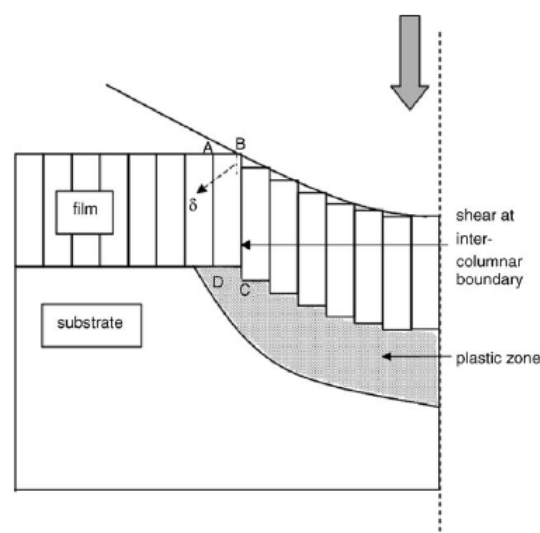


Figura 3.5. Esquema del deslizamiento entre columnas y la expansión de la cavidad en el sustrato de acero [9]

En los recubrimientos gruesos sobre sustratos blandos se da un modo completamente distinto de fractura impulsada en gran parte por el límite elástico. Este comportamiento se caracteriza por la casi o nada aparición del deslizamiento columnar, en contraposición se inducen grandes grietas y un modo de cizalla de grietas sobre planos inclinados, véase la Figura 3.6. Dichas grietas inclinadas son capaces de inducir el desconche del material. De manera que, la poco cuasi-plasticidad que exhibe el recubrimiento, a modo de deslizamiento columnar, no se observa en este tipo de modo de fallo [9].



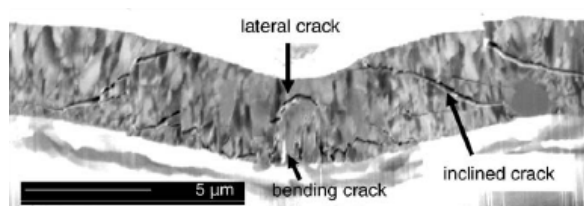


Figura 3.6. Sección transversal donde se muestra la presencia de grietas inclinadas, laterales y flexionadas [9]

Jayaram y colaboradores determinaron que el dominio de una conducta u otra viene marcado por la dureza del sustrato y el grosor del recubrimiento. La justificación de dicha dependencia es que para sustratos poco duros o lejanos al recubrimiento (grosor de éste elevado), el esfuerzo a lo largo de la columna de TiN no alcanza el valor crítico antes significativo en la plasticidad del sustrato. De manera que, en un sustrato duro las grietas inclinadas no aparecen nunca, incluso cuando el desplazamiento del indentador es varias veces el grosor del recubrimiento [9].

En este contexto, Stoiber observó que el recubrimiento de TiN depositado sobre un sustrato de acero trabajado en frío sin nitrurar muestra una adherencia muy baja presentando una delaminación adhesiva completa alrededor de la cavidad de la indentación. En cambio, la adherencia mejora para el mismo recubrimiento utilizando las mismas condiciones de deposición y el mismo sustrato, pero ahora con un proceso de nitrurado similar al usado en el pretratamiento de una muestra de TiN al ser preparada para obtener una intercara recubrimiento/sustrato delgada[10].

Una de las características que presenta es el aumento del rendimiento de mecanizado y zonas de corte. En aplicaciones de conformado cabe destacar las mejoras en la fluencia de las chapas a deformar, evitando arrugas, microsoldaduras, incluso en zonas conflictivas, donde el material tiende a acumularse o a estirarse.

Entre los mayores logros conseguidos por el TiN se encuentran la minimización de los problemas causados por dobles espesores de chapa, uniones por soldadura, extracciones de los punzones y expulsión de las piezas estampadas así como la reducción del uso de productos lubricantes.

Se trata de un recubrimiento que se utiliza en herramientas de arranque de viruta, útiles de conformado, matrices, moldes, etc.







## **4. ACEROS RECUBIERTOS**

Los aceros recubiertos muestran una microestructura particular que produce una combinación de propiedades mecánicas extraordinaria, permitiendo el uso de este tipo de materiales en un amplio rango de aplicaciones. Las herramientas de aceros recubiertos están sujetas a un estado complejo de carga (impacto, contacto mecánico, desgaste, etc.) que determina su tiempo de vida. Por otro lado, la necesidad de alargar el tiempo de vida de las piezas y minimizar el uso de lubricantes para reducir el tiempo, el mantenimiento y los costes de fabricación ha llevado a algunos aceros a la necesidad de ser recubiertos.

Las propiedades mecánicas de los sistemas recubiertos no dependen sólo de las propias características del sustrato y del recubrimiento, sino de la naturaleza y la resistencia de la intercara además de la respuesta conjunta de dicho sistema bajo una carga aplicada.

### **4.1. ENSAYOS DE IMPACTO Y DE FATIGA EN SISTEMAS RECUBIERTOS**

Algunos sistemas recubiertos han sido investigados usando ensayos de impacto, que generan un campo de esfuerzos similar al creado en los ensayos de Hertz. Dicho ensayo de impacto consiste en aplicar una carga dinámica mediante una bola dura que impacta de manera repetida sobre la superficie del recubrimiento, con el objetivo de reproducir las condiciones de uso de las herramientas de trabajo en frío y, de esta manera, determinar cuantitativamente el comportamiento a la fatiga por contacto [10]-[14], [20]-[22].

Estos estudios presentan los resultados obtenidos en términos del comportamiento a la fatiga del recubrimiento, sin considerar las características mecánicas del sustrato y de la evolución del daño, para un nivel de carga dado, a través de la vida a fatiga. Por lo tanto, con estos ensayos es difícil diferenciar los aspectos atribuidos al sistema recubierto y a la condición de carga, así como la susceptibilidad a la fatiga y el esfuerzo crítico aplicado en el sistema recubierto.

#### **4.1.1. TEORÍA DE HERTZ**

Desde la primera experimentación de Hertz, las indentaciones mecánicas se han usado extensamente en el análisis y la caracterización de las propiedades de deformación y fractura de cerámicas frágiles, así como de metales y otros materiales. El daño por indentación se relaciona con un amplio rango de propiedades mecánicas, como la dureza, la resistencia y el desgaste. Tal daño es un factor restrictivo en la vida de las cerámicas [12].



Los ensayos de Hertz, es decir de indentación esférica, permite la determinación de propiedades mecánicas intrínsecas de materiales cerámicos y la simulación de las sollicitaciones mecánicas reales de estos materiales en ciertas aplicaciones de herramientas de trabajo en frío [12].

Para que las suposiciones de la teoría de Hertz sean válidas los materiales tienen que ser homogéneos e isotrópicos. Para este tipo de materiales, se produce un campo de tensiones hidrostático en el centro de la indentación, donde la tensión de compresión es máxima. En un sistema o sustrato con diferentes constantes elásticas y plásticas, la distribución de tensiones no será hidrostática.

En los ensayos de contacto, el aumento de la carga y del número de impactos conduce a la reducción de la presión superficial efectiva debido al incremento del área de contacto entre la muestra ensayada y la bola que produce la indentación. Los esfuerzos generados no son directamente proporcionales a las fuerzas ejercidas en dicho ensayo, sino que crecen mucho más lentamente que éstas [14].

El ensayo hertziano permite identificar distintos modos de daño a través de la evolución desde la elasticidad inicial hasta desarrollar totalmente la plasticidad. Dichos modos de daño son la cuasi-plasticidad en el sustrato y el recubrimiento, la fractura frágil, grietas anillo, cónicas o radiales y el fallo de la intercara. El tipo de fallo depende de su rigidez, del grosor del recubrimiento, del radio de curvatura y de la carga aplicada.

La microestructura es una de las características más importantes del material para la aparición de las grietas como o del daño cuasi-plástico. Por otro lado, la disminución de la dureza y el incremento del tamaño de grano producen una progresión frágil-dúctil. Por lo tanto, debido a estos parámetros, el comportamiento del material depende en gran manera de las condiciones de procesado.

El comportamiento frágil es característico de cerámicos homogéneos de grano fino. Esta situación se caracteriza por el fenómeno de grieta anillo y su crecimiento cónico es más evidente cuando más fino sea el grano. En cambio, la deformación cuasi-plástica se asocia a cerámicos heterogéneos más tenaces [13].

#### **4.1.2. FRACTURA CÓNICA DE HERTZ**

La formación de grietas, como la mostrada en la Figura 4.1 se inicia en la superficie y fuera de la zona de contacto, aunque cercana a ésta. Estas grietas tienen como origen la existencia de defectos superficiales que quedan sometidos a tensiones de tracción en la zona cercana al contacto. Al alcanzar una determinada carga crítica, una grieta se inicia y se propaga a través del defecto alrededor del contacto formando una fisura superficial tipo anillo. Una carga ligeramente mayor permite que este anillo inicial crezca ligeramente en



profundidad hacia el interior del material. Existe otra carga crítica a partir de la cual la grieta anillo se vuelve inestable y se propaga hacia el interior del material formando un cono, fenómeno que se conoce como grieta cono.

Las grietas aparecen debido a defectos preexistentes en la superficie. Este hecho llevó a ciertos autores a argumentar que cuanto menor era el radio del indentador, menor sería la probabilidad de encontrar un defecto suficientemente grande. Pero experimentos posteriores en superficies con defectos controlados demostraron la tensión necesaria para generar una grieta frente al tamaño de los defectos en la región de Auerbach [15].

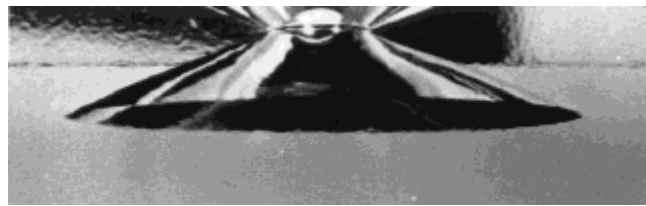


Figura 4.1. Fotografía de una grieta cónica de Hertz [12]

#### 4.1.3. DAÑO CUASI-PLÁSTICO

La observación subsuperficial del daño que causa el indentador permite analizar el daño cuasi-plástico, como el observado en la Figura 4.2. Al analizar indentaciones realizadas con distintas cargas crecientes se observa la evolución de la cuasi-plasticidad desde el inicio hasta la plasticidad total [12].

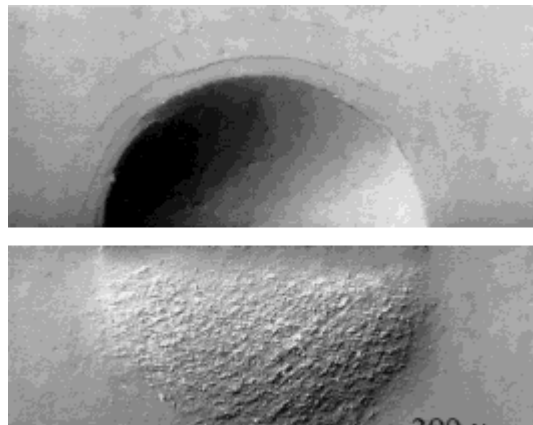


Figura 4.2. Daño cuasi-plástico aparecido en una huella indentada [12]

Para cargas muy altas o gran número de ciclos, el daño en materiales heterogéneos, puede provocar que las microgrietas adyacentes se unan, conduciendo a una pérdida de material acusada dada su menor resistencia al desgaste [12].



El daño subsuperficial que experimentan los cerámicos tenaces se puede asemejar a la deformación plástica que sufren los metales, exceptuando el hecho de que en este caso está mucho más concentrada justo por debajo de la zona de contacto. Por lo tanto, por encima de un esfuerzo dado, los materiales relativamente dúctiles se deforman plásticamente en la zona justo por debajo del contacto. Desde el punto de vista analítico, la transición de la región elástica a la plástica se observa al perderse la linealidad en las gráficas de tensión-deformación de las indentaciones.

La zona plástica se expande siempre bajo el perímetro elástico de contacto, hasta que se llega a un estado total de plasticidad. En esta región, el campo de tensiones hertziano está significativamente modificado.

La tendencia a la cuasi-plasticidad en cerámicas tenaces pueden estar acompañada de la inhibición de las grietas cono, debido a la microestructuras más gruesas que provocan la deflexión de la grieta a través de interfases más débiles [12].

#### **4.1.4. FATIGA POR CONTACTO**

La fatiga por contacto provoca la extensión de las grietas cono en materiales frágiles. En cambio, en los materiales tenaces potencia la acumulación de daño de las intercaras y la coalescencia de microfisuras, con la posterior pérdida de material, debido a la susceptibilidad de estas microestructuras al desgaste. Es decir, el daño se acumula por desgaste de las intercaras en contacto de las microfisuras en la zona cuasi-plástica. Este desgaste se manifiesta como una reducción progresiva de la fricción a medida que aumenta el número de ciclos.

Los cerámicos tenaces son más susceptibles a fatiga que los frágiles. La dificultad de detección de la grieta en las fases iniciales supone un contratiempo en el uso de dichos materiales [12].





## 5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 5.1. MATERIAL EMPLEADO

En este documento se han evaluado tres sistemas integrados por tres sustratos de acero para trabajo en frío, recubiertos con TiN. Los sustratos referidos corresponden a un acero DIN 1.2379 y otros dos aceros comerciales desarrollados por ROVALMA: UNIVERSAL y HWS. Las dimensiones de las muestras empleadas son 40 mm de diámetro y 5mm de espesor.

#### 5.1.1. PROCESO DE DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

El recubrimiento de TiN desarrollado por la Asociación de la Industria Navarra AIN fue realizado mediante un equipo de evaporación por arco catódico (proceso descrito anteriormente en el apartado 3.2.3) reactivo METAPLAS MZR323. Este sistema cuenta con seis evaporadores cilíndricos que trabajan a 30 V y 100 A en presencia de un campo magnético débil. Las muestras, antes de ser introducidas en la cámara de tratamiento, se limpiaron en un detergente alcalino y posteriormente en un baño ultrasónico con acetona. Para la limpieza iónica se utilizó el proceso AEGD (Arc-Enhanced Glow Discharge) en un plasma de argón. En este proceso se producen iones de argón mediante arco eléctrico en un cátodo de titanio apantallado, de modo que se evita la deposición de microgotas en la muestra durante el proceso de deposición. Se utilizó como gas reactivo para la formación de las capas de nitruro de titanio, la temperatura de deposición se situó entorno a 400 – 500 °C. El vacío en la cámara de tratamiento previo a la deposición era de  $10^{-6}$  mbar y la presión durante la deposición se mantuvo entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$  mbar. El espesor aproximado de las capas de TiN es de 2  $\mu\text{m}$ .

### 5.2. DUREZA DEL SUSTRATO

Se realizaron ensayos de dureza Rockwell C para comprobar la dureza de los tres sustratos, para los que se empleó una máquina HOYTOM 1 003 AD, como la mostrada en la Fig. 5.1.

Previamente a cada ensayo, la mitad de una muestra se preparó metalográficamente, tal como se especifica en la Tabla 5.1. Posteriormente, mediante un indentador cónico de diamante se aplicó una precarga para eliminar el efecto de la deformación plástica y, finalmente, se aumentó la carga hasta 150 kg durante 20 s.



Se realizaron un total de tres mediciones para cada muestra y se obtuvieron los resultados de los valores promedio de dureza se muestran en la Tabla 5.2.



Figura 5.1. Máquina HOYTOM 1 003 AD

	MEDIO	DISCOS	TIEMPO (min)
<b>Desbaste</b>	Agua	MD-Piano 220	10
	Agua	600 SiC	10
	Agua	1200 SiC	10
<b>Pulido</b>	Suspensión de diamante de 6 $\mu$ m y lubricante	Paño	10
	Suspensión de diamante de 3 $\mu$ m y lubricante	Paño	20
	Sílice coloidal	Paño	20

Tabla 5.1. Fases de la preparación metalográfica de la muestra para el ensayo Rockwell C



MATERIAL	DIN 1.2379	UNIVERSAL	HWS
DUREZA (HRC)	$60 \pm 0,5$	$62 \pm 0,5$	$64 \pm 0,5$

Tabla 5.2. Durezas de los sustratos

### 5.3. INDENTACIÓN ESFÉRICA MONOTÓNICA

#### 5.3.1. ENSAYO SOBRE LOS SISTEMAS RECUBIERTOS

Para realizar los ensayos de indentación esférica bajo solicitaciones monotónicas se usó una máquina servohidráulica INSTRON Modelo 8511 (Fig. 5.2) bajo las condiciones de ensayo que se especifican en la Tabla 5.3. Sobre las muestras se aplicaron cargas desde 400N a 2000N con indentadores esféricos de metal duro de diámetro 1, 2,5 y 5 mm. La razón de utilizar distintos diámetros de indentador es para generar impresiones con diferentes radios residuales.

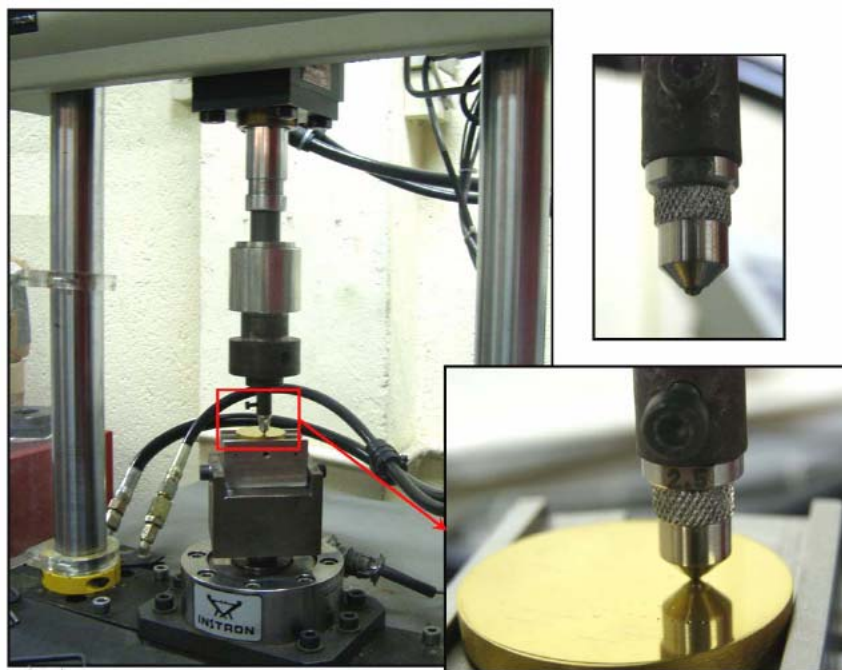


Figura 5.2. Máquina INSTRON Modelo 8511





Posteriormente, se adquirieron imágenes por microscopía óptica de cada una de las huellas residuales haciendo la medición del diámetro de las mismas mediante el software MOTIC IMAGES ADVANCED 3.0. Un ejemplo sobre este método se muestra en la Figura 5.3.

El estudio monotónico se centró en la determinación de las curvas tensión – deformación y la carga crítica y la presión para la aparición de daño.

Condiciones de ensayo	
Carga inicial	50 N
Velocidad de carga	30 N/s
Tiempo de carga	20 s
Velocidad de descarga	50 N/s

Tabla 5.3. Condiciones para los ensayos monotónicos

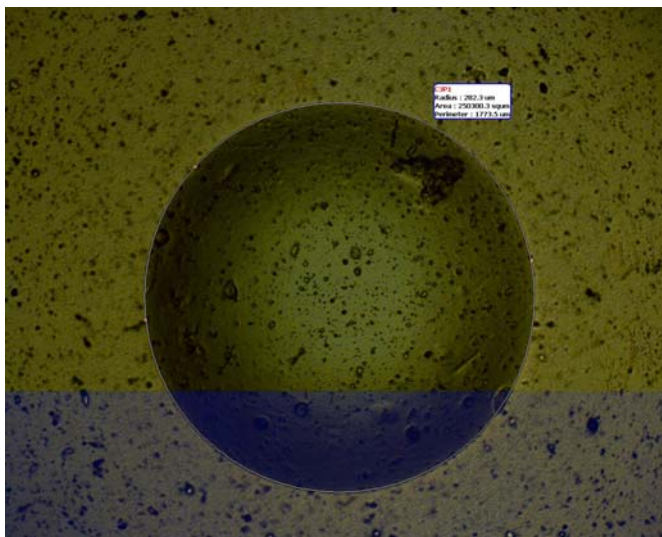


Figura 5.3. Medición de una huella mediante el software



### 5.3.2. ENSAYO SOBRE LOS SUSTRATOS

También se realizaron ensayos de indentación esférica monotónica sobre unas probetas de los sustratos sin recubrir. El objetivo de este ensayo era determinar el comportamiento de los sustratos sin ser recubiertos y la influencia de éstos en los sistemas ya recubiertos.

De la misma manera, se realizaron indentaciones con esferas de diámetro 1, 2,5 y 5 mm con cargas que oscilan entre 600 y 3000 N. Una vez finalizados todos los ensayos, se analizaron mediante microscopía óptica para determinar el daño causado y medir el diámetro de las huellas provocadas para establecer el límite elástico y la carga crítica.

## 5.4. FATIGA POR CONTACTO ESFÉRICO

### 5.4.1. ENSAYO SOBRE LOS SISTEMAS RECUBIERTOS

El ensayo de fatiga consiste en aplicar una carga específica de manera repetida durante un número determinado de ciclos. Estos ensayos se realizaron con la misma máquina descrita en la sección 5.3 usando una esfera de metal duro de 2,5 mm de diámetro, como se puede observar en la Figura 5.4, aplicando cargas cercanas e inferiores a la carga crítica determinada mediante los ensayos de indentación monotónica.

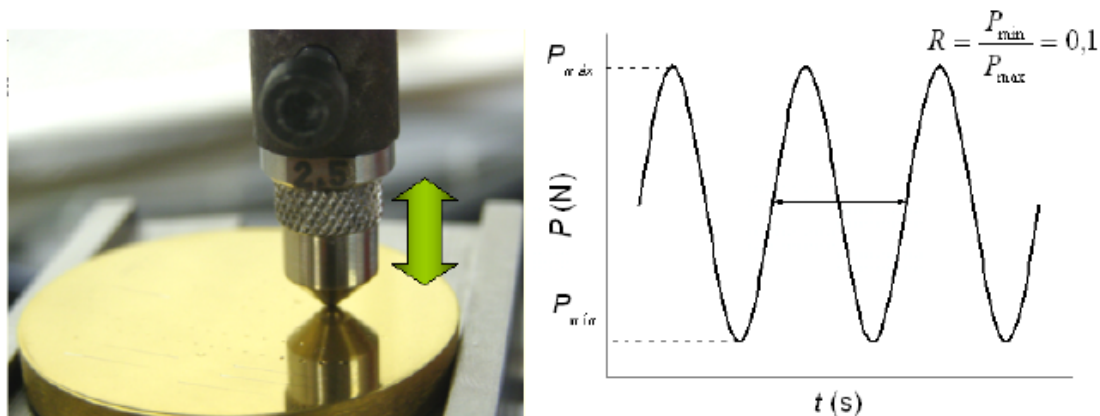


Figura 5.4. Condiciones experimentales implementadas en los ensayos bajo cargas monotónicas

Las cargas aplicadas fueron sinusoidales, donde el punto medio y la amplitud se calcularon mediante las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3. El rango de cargas aplicado fue entre 900 y 400 N, el número de ciclos varió entre  $10^3$  y  $10^6$  y la frecuencia fue de 10Hz, exceptuando el caso de  $10^6$  ciclos que se utilizó una frecuencia de 12 Hz.



$$R = 0,1 \rightarrow R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \rightarrow P_{\min} = P_{\max} \cdot R \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$P_{\text{media}} = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\text{Amplitud} = \frac{\Delta P}{2} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Mediante el contacto bajo solicitaciones cíclicas se obtuvieron las curvas presión – número de ciclos, del cual se determinaron los parámetros de límite y sensibilidad a la fatiga del sistema sustrato – recubrimiento.

## 5.5. EVALUACIÓN DE MODOS DE DAÑO

Por último fue necesario realizar algunos ensayos de indentación monotónica y de carga cíclica sobre las secciones transversales para evaluar el daño en profundidad. Para realizarlo fue necesario el siguiente procedimiento con cada una de las muestras:

1. Cortar longitudinalmente dos secciones de una probeta recubierta con una máquina cortadora STRUERS ACCUTOM-50, como se muestra en la Figura 5.5.
2. Encastar, con una máquina encastadora LABOPRESS – 3 de STRUERS, mediante baquelita las dos partes con las caras recubiertas unidas para desbastar y pulir la cara resultante con la pulidora manual ECOMET – 4 de BUELHER, perpendicular a las caras sustrato – recubrimiento – recubrimiento –sustrato.
3. Romper la baquelita y volver a encastar las dos partes, por las caras recubiertas de manera que se protege el recubrimiento, uniendo sus superficies pulidas. En el momento de unir dichas partes se debe de tener en cuenta que la separación entre ambas no debe superar 10  $\mu\text{m}$ . De esta manera se puede ensayar la sección transversal.

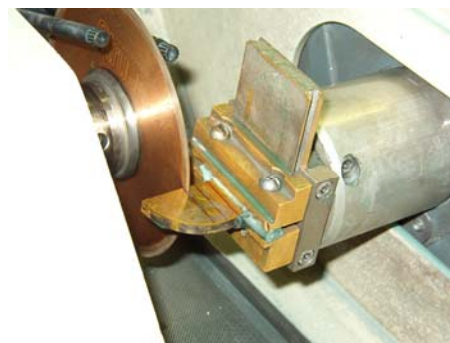


Figura 5.5. Operación de corte sobre la probeta mediante diamante



A continuación, se realizaron dos ensayos monotónicos, practicando indentaciones con una esfera de 2,5 mm de diámetro a lo largo de la línea de la sección transversal. El objetivo de estos ensayos era visualizar el daño en profundidad antes y después de observar grietas en la superficie recubierta.

En la misma muestra, se realizaron diferentes ensayos de fatiga, con distintas cargas aplicadas a diversos números de ciclos.

Al finalizar todos los ensayos, se desencastó cada muestra para así inspeccionar la sección transversal. Mediante tecnología SEM se observaron los distintos daños que sufre el sistema en profundidad, así como si las grietas ocurridas en la superficie penetran en la muestra.





## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. INDENTACIÓN ESFÉRICA MONOTÓNICA

El ensayo Hertziano, es decir, de indentación esférica bajo sollicitaciones monotónicas nos permite obtener la respuesta mecánica al contacto de los tres sistemas recubiertos con TiN, anteriormente mencionados. En la Figura 6.1 se muestran ejemplos de huellas obtenidas con indentadores de diferentes diámetros. Al aumentar la carga, las huellas generadas con los indentadores son más grandes y profundas. Al usar el indentador de 0,5 mm de radio se aplica una fuerza en un área más pequeña, en comparación con las esferas de radio 1,25 y 2,5 mm, lo que promueve un campo de tensiones mayor y la aparición de huella para cargas relativamente bajas. En cambio, se necesitan cargas más elevadas para que se muestre una impresión con una esfera de 2,5 mm de radio. Por lo tanto, la esfera de 1,25 mm es el punto medio entre estos dos comportamientos, lo que permite aplicar un mayor rango de cargas viéndose una aparición gradual del daño dentro del material.

Las mediciones realizadas fueron la carga máxima aplicada durante el ensayo ( $P$ ) y el radio de la huella residual de la indentación ( $a$ ). Estos valores permitieron obtener las curvas tensión-deformación de indentación. Para ello, se aplicó la ecuación 6.1 [24]:

$$P_0 = \frac{P}{\pi \cdot a^2} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

La Figura 6.2 muestra un ejemplo de la curva tensión - deformación de las huellas producidas por los distintos indentadores sobre una muestra de HWS recubierta con TiN. Se despreciaron algunas mediciones de radio de huellas para el indentador de 0,5mm, debido a que el margen de error en la medición de la huella incrementa conforme la huella deformada es menos perceptible a través de microscopía óptica.

Las curvas elásticas de cada sistema se estimaron empleando la ecuación 6.2 [23]:

$$P_0 = \left( \frac{4E^*}{3\pi} \right) \left( \frac{a}{r} \right) \quad (\text{Ec. 6.2})$$

donde  $E^*$  es el módulo elástico efectivo y se define como la ecuación [6]:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu}{E} + \frac{1-\nu'}{E'} \quad (\text{Ec. 6.3})$$



siendo  $E$  y  $\nu$  el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del sustrato, respectivamente. De igual forma,  $E^*$  considera las mismas constantes elásticas correspondientes al indentador  $E'$  y  $\nu'$ . En la Tabla 6.1 se muestran los valores empleados para la obtención de las curvas elásticas de cada uno de los sistemas.

La presión límite de fluencia para cada sistema,  $p_y$ , se obtuvo a partir de la intersección de la curva  $p_0$  vs.  $a/r$  del sistema correspondiente ajustada potencialmente con su curva elástica (Tabla 6.2).

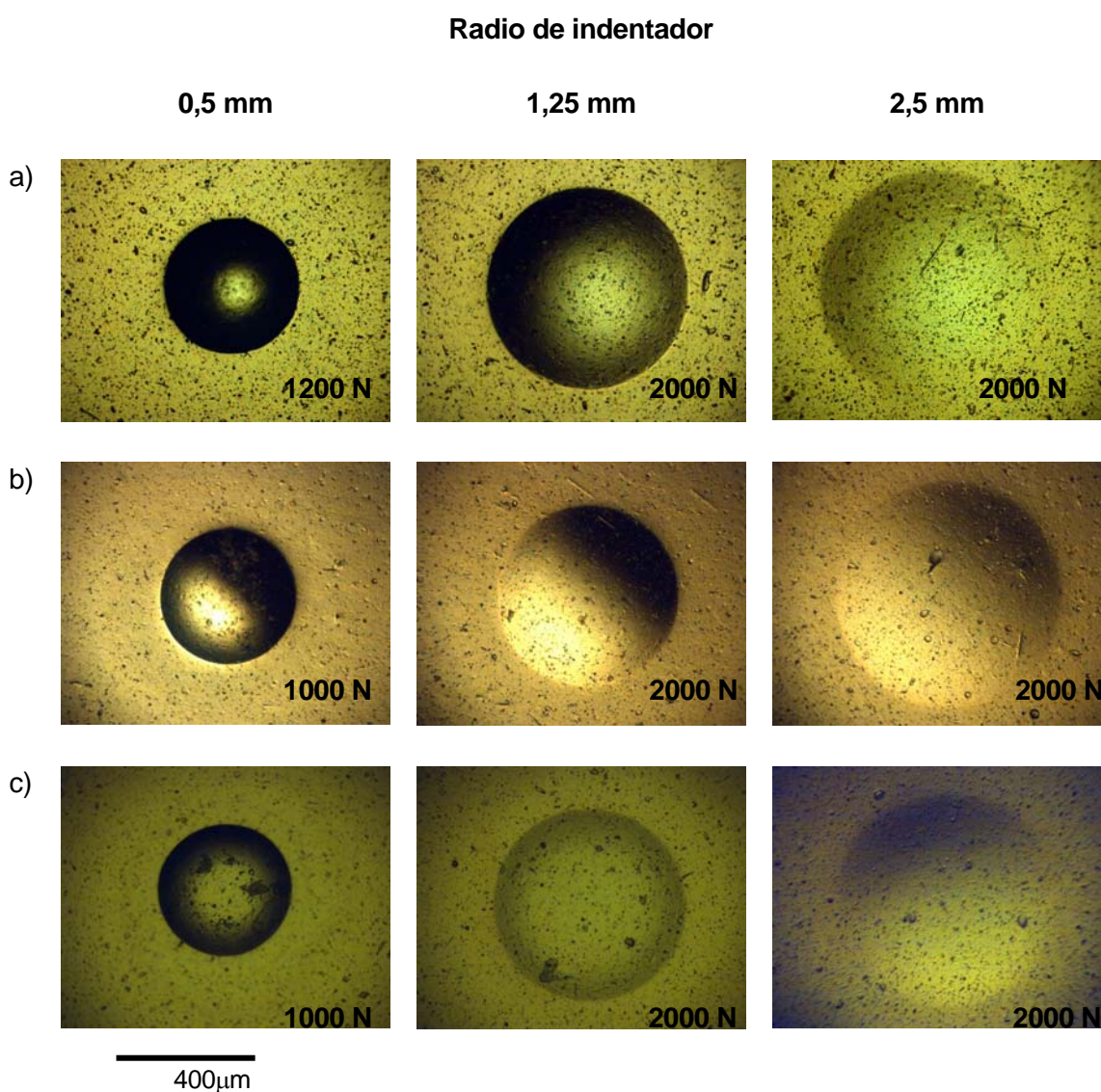
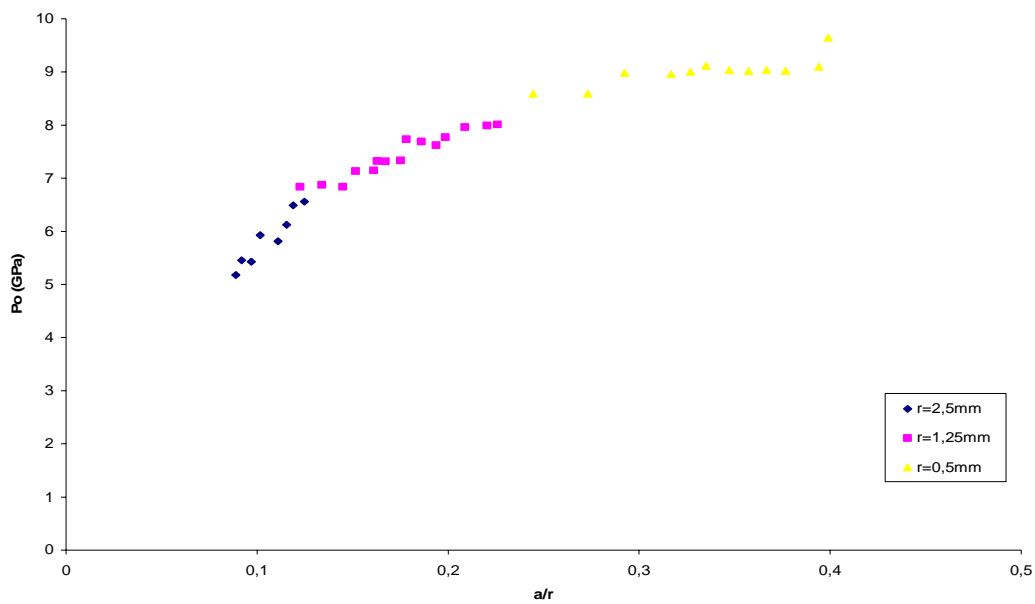


Figura 6.1. Ejemplos de huellas residuales obtenidas por contacto esférico de tres radios distintos aplicados sobre a) 1.2379 + TiN, b) UNIVERSAL + TiN y c) HWS + TiN





Figura 6.2. Curva  $P_0$  vs.  $a/r$  para HWS + TiN

	Sustrato		Indentador		$E^*$ [GPa]
	E [GPa]	$\nu$	$E'$ [GPa]	$\nu'$	
DIN 1.2379	210	0,3	540	0,21	164
Universal	219	0,3	540	0,21	169
HWS	218	0,3	540	0,21	168

Tabla 6.1. Valores empleados para la obtención de las curvas elásticas de los tres sistemas

Sistema	Presión límite de fluencia, $P_y$ [GPa]
TiN + 1.2379	5.3
TiN + Universal	5.2
TiN + HWS	6.0

Tabla 6.2. Presiones límite de fluencia para cada uno de los sistemas

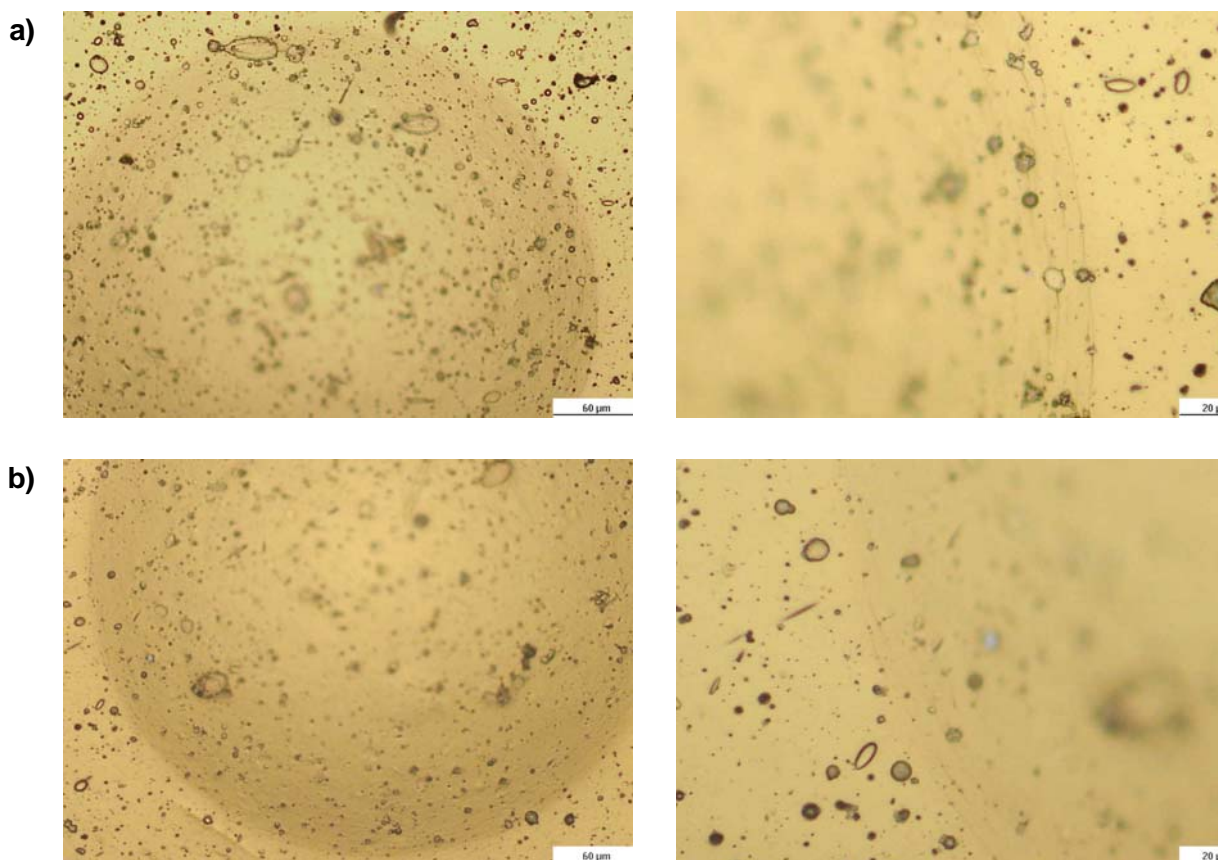




## 6.2. CRITERIO DE DAÑO

En cuanto al criterio de daño generado bajo solicitaciones monotónicas, la carga crítica,  $P_{c1}$ , para cada sistema se determinó como aquel valor donde aparecieron grietas circunferenciales en el recubrimiento y en la periferia de las huellas residuales, como se muestra en la figura 6.3. De esta manera, la presión límite monotónica,  $p_{c1}$ , se definió como la presión máxima a la aparición de fisuras en el recubrimiento, y cuyos valores se muestran en la tabla 6.3.

En la figura 6.4 se observa que para poder generar deformación por indentación monotónica en el sistema TiN + HWS se requieren presiones medias iguales o superiores a 6 GPa. En cambio, alrededor de 5 GPa la aparición de huellas es evidente en los sistemas TiN + 1.2379 y TiN + Universal. Sin embargo, este comportamiento puede estar atribuido a la diferencia en la dureza del acero HWS (~ 64 HRC). Cabe mencionar, que mediante una simple inspección de las huellas residuales, es evidente que la cedencia plástica de los tres sistemas sustrato-recubrimiento estudiados es un requisito indispensable para la aparición de grietas circulares en el recubrimiento, tal y como se ha reportado en estudios previos [11].



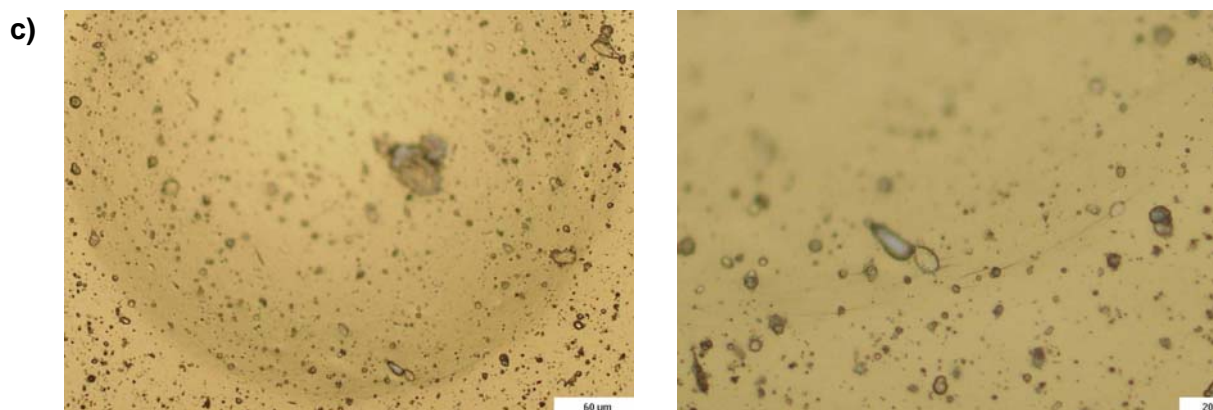


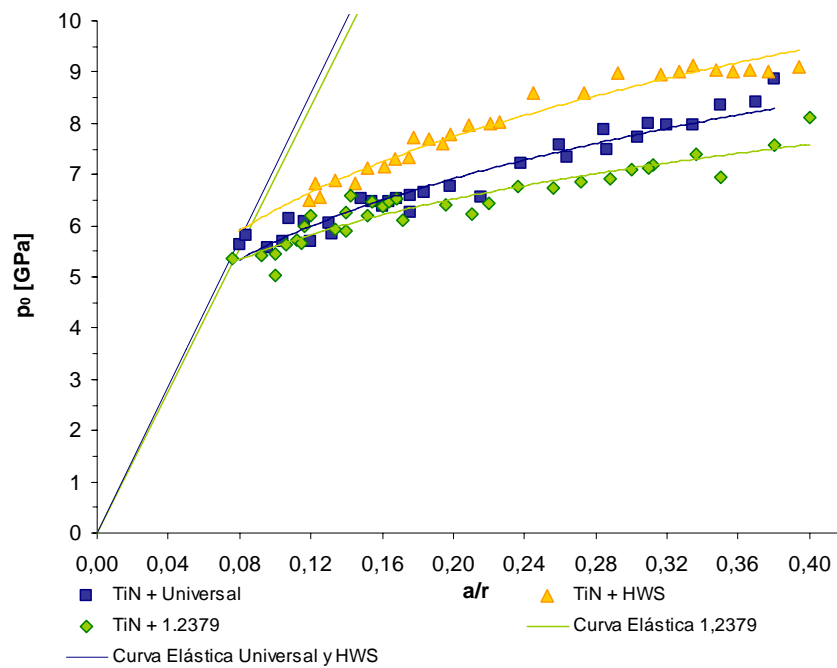
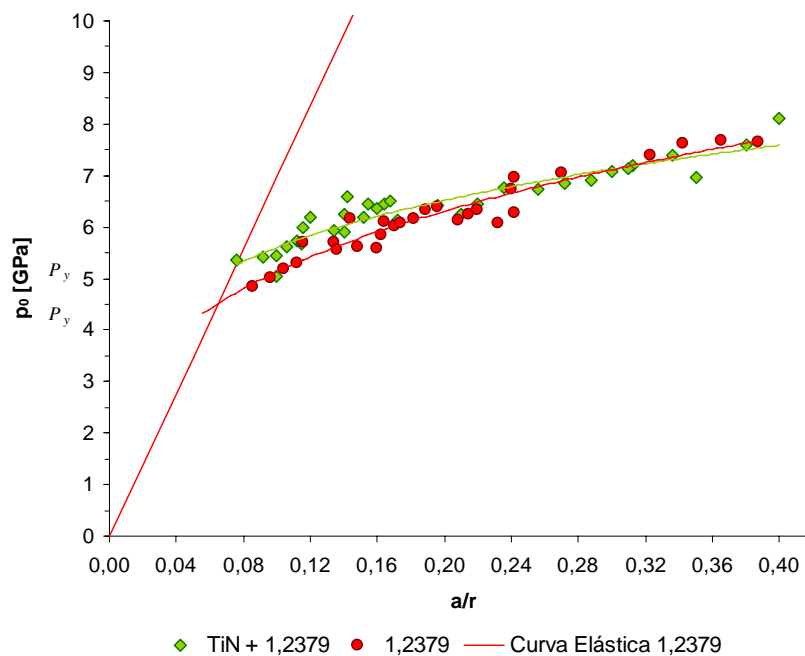
Figura 6.3. Micrografías de la aparición de grietas para la carga crítica en a) DIN + 1.2379, b) UNIVERSAL + TiN y c) HWS + TiN

Sistema	Carga crítica para la aparición de grietas, $P_{c1}$ [N]	Presión crítica para la aparición de grietas, $p_{c1}$ [GPa]
TiN + 1.2379	800	6.4
TiN + Universal	1000	6.6
TiN + HWS	1000	7.3

Tabla 6.3. Valores obtenidos en los ensayos monotónicos para los distintos sistemas

Los resultados mostrados en la Figuras 6.5, 6.6 y 6.7, indican que no hay diferencias sustanciales en las curvas presión-deformación obtenidas para cada sistema recubierto con respecto a las del correspondiente sustrato desnudo, independientemente del sustrato o recubrimiento bajo consideración. Las diferencias en los valores de cedencia entre los sustratos desnudos y los sistemas recubiertos (tablas 6.4 y 6.2) pueden deberse a la dispersión en los valores de presión generados por la medición de la huellas. Sin embargo, sí existen cambios relevantes en referencia a la observación de daño crítico. En este contexto, la aparición de fisuras circunferenciales es un fenómeno exclusivamente observado en sistemas recubiertos, y para los componentes TiN + 1.2379 y TiN + Universal ocurre a niveles similares de presión aplicada. Por otra parte, la aparición de grietas circunferenciales en el sistema TiN + HWS ocurre en un orden de aproximadamente 1 GPa por encima de los otros sistemas.



Figura 6.4. Curvas  $P_0$  vs.  $a/r$  para los tres sistemas recubiertosFigura 6.5. Curvas  $P_0$  vs.  $a/r$  del acero DIN 1.2379 y del sistema recubierto 1.2379 + TiN

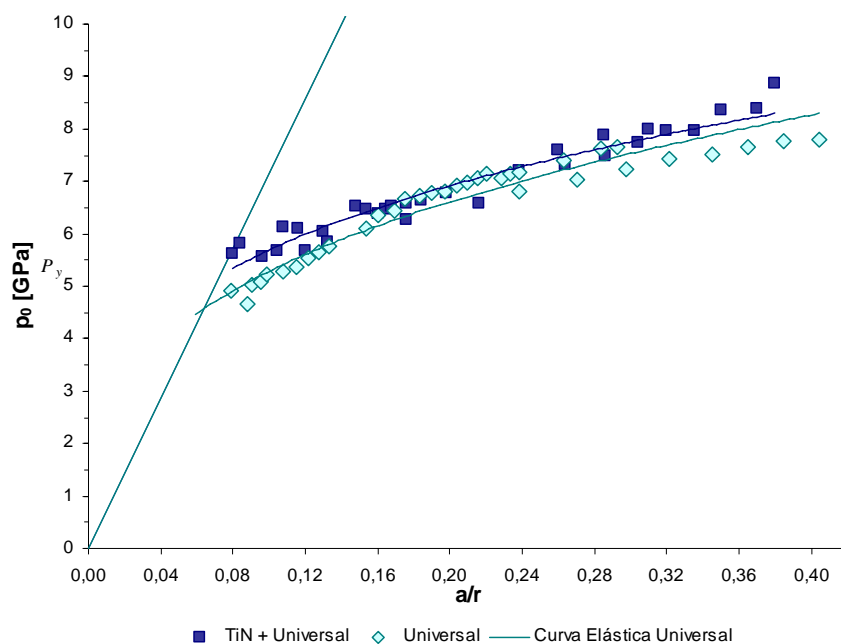


Figura 6.6. Curvas  $P_0$  vs.  $a/r$  del UNIVERSAL y del sistema recubierto UNIVERSAL + TiN

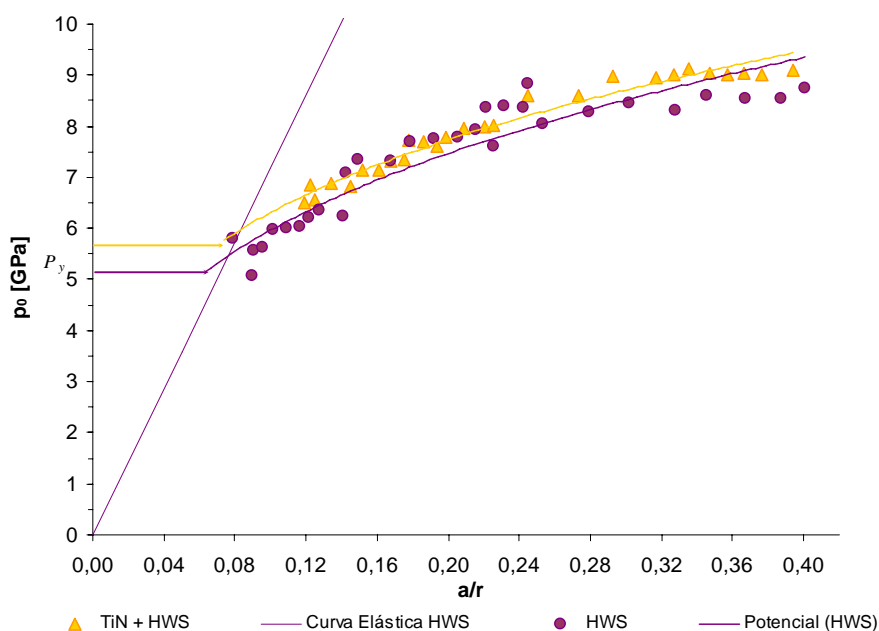


Figura 6.7. Curvas  $P_0$  vs.  $a/r$  del HWS y del sistema recubierto HWS + TiN



Sistema	Presión límite de fluencia, $P_y$ [GPa]
1.2379	4.3
Universal	4.3
HWS	5.2

Tabla 6.4. Presiones límite de fluencia para cada uno de los sustratos

Finalmente, un análisis más detallado en las huellas generadas en los sustratos desnudos, específicamente los aceros 1.2379 y Universal, sólo evidencia microfisuras en el contexto de los carburos individuales, como se muestra en la figura 6.8. Para el primero son grietas no circunferenciales y sin propagarse hacia la matriz ubicadas en la periferia de la huella, y a niveles de tensión monotónicos próximos a 7 GPa. En el caso del Universal, las grietas que se observan son del mismo tamaño de los carburos y están ubicadas en éstos apareciendo a niveles de tensión monotónicos alrededor de 8 GPa. En cambio, en el acero HWS no se observó ningún tipo de fisura para los niveles de presión evaluados.

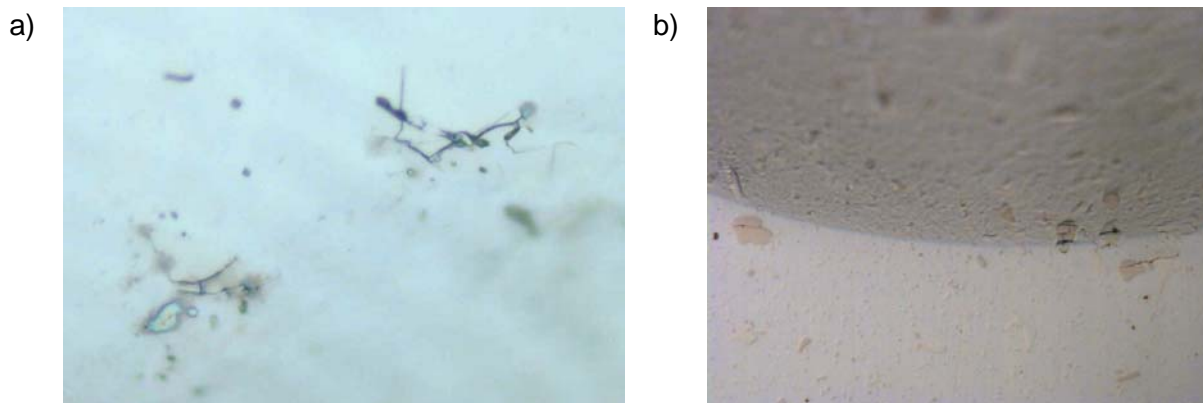


Figura 6.8. Microfisuras aparecidas en los carburo de los sustratos de a) DIN 1.2379 y b) UNIVERSAL



### 6.3. FATIGA POR CONTACTO ESFÉRICO

Los efectos observados sobre el sistema estudiado en indentación esférica monotónica se acentuaron con la aplicación de cargas cíclicas. A continuación, se estudió el efecto de la fatiga por contacto esférico en cada uno de los sistemas recubiertos.

Los ensayos de indentación cíclica fueron llevados a cabo para evaluar la susceptibilidad de los sistemas recubiertos a la aparición de daño cuando el esfuerzo aplicado o el número de ciclos aumentan. Para poder determinar dicho efecto, se analizaron mediante microscopia óptica las huellas producidas por el indentador, como se muestran en las figuras 6.9, 6.10 y 6.11, y se confeccionaron las curvas P-N para cada sistema. Estas curvas, mostradas en las figuras 6.12, 6.13 y 6.14, determinaron la aparición del daño en el sistema estudiado.

Según los criterios de fallo definidos en el apartado 6.2 la aparición de daño en forma de grietas circulares ocurre en el recubrimiento después de un cierto número de ciclos para una carga inferior a la crítica determinada en los ensayos monotónicos. De manera análoga, se estableció  $P_{f1}$  como la carga crítica a fatiga para la aparición de grietas circulares en 100 000 ciclos, donde está considerado el tiempo óptimo de vida para una matriz de conformado. En este contexto, el sistema TiN + HWS no mostró grietas circunferenciales para el rango de cargas evaluado en  $10^5$  ciclos, pero se observó que a una carga de 700 N durante  $10^4$  ciclos las grietas ya son apreciables, con lo cual se espera que para la misma carga a  $10^5$  ciclos estas grietas sean más evidentes. Por tal motivo, en la tabla 6.5 se asumió un valor de  $P_{f1}$  superior a 600 N para el sistema TiN +HWS.

Adicionalmente, y conforme se incrementa la carga o número de ciclos, los sistemas recubiertos sometidos a fatiga muestran otros mecanismos de fallo, de tipo cohesivo o “spalling” ( $P_{f2}$ ) y decohesivo o delaminación ( $P_{f3}$ ). Los valores de carga crítica asociados a estos daños se muestran en las tablas 6.6 y 6.7, respectivamente. El único sistema que presenta los tres mecanismos de daño es el acero 1.2379 recubierto con TiN, tal y como se observa en la figura 6.15. En primera instancia podría correlacionarse este fenómeno a la dureza del sustrato ( $HRC_{1.2379} < HRC_{HWS}$ ), sin embargo el acero Universal tiene una dureza y una presión límite de cedencia semejantes a la del 1.2379. Asimismo, el fallo cohesivo ( $P_{f2}$ ) se aprecia para los tres sistemas (tabla 6.6) únicamente con cargas aplicadas cíclicamente, como se puede observar en las Figuras 6.15, 6.16 y 6.17.

Durante los ensayos cíclicos se observó que la deformación acumulada y el daño en las huellas esféricas residuales son más amplios con el incremento del número de ciclos. Estas conclusiones concuerdan con la literatura de sistemas recubiertos existente hasta ahora [11],[14] donde se afirma que el crecimiento del diámetro de las huellas y del volumen de la cavidad indentada es proporcional al aumento de número de ciclos.





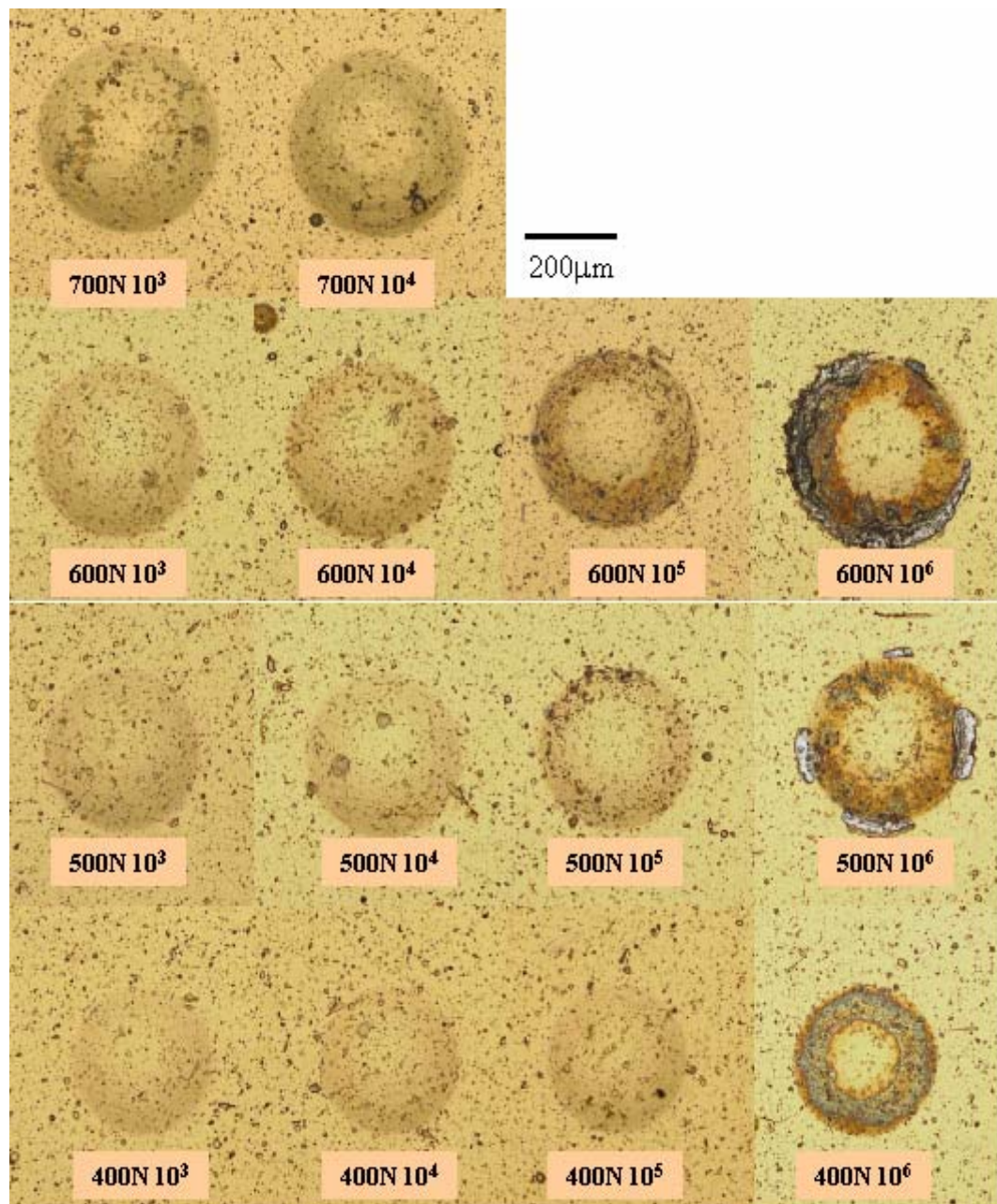


Figura 6.9. Huellas aparecidas en el recubrimiento del sistema DIN 1.2379 + TiN después de los ensayos de fatiga



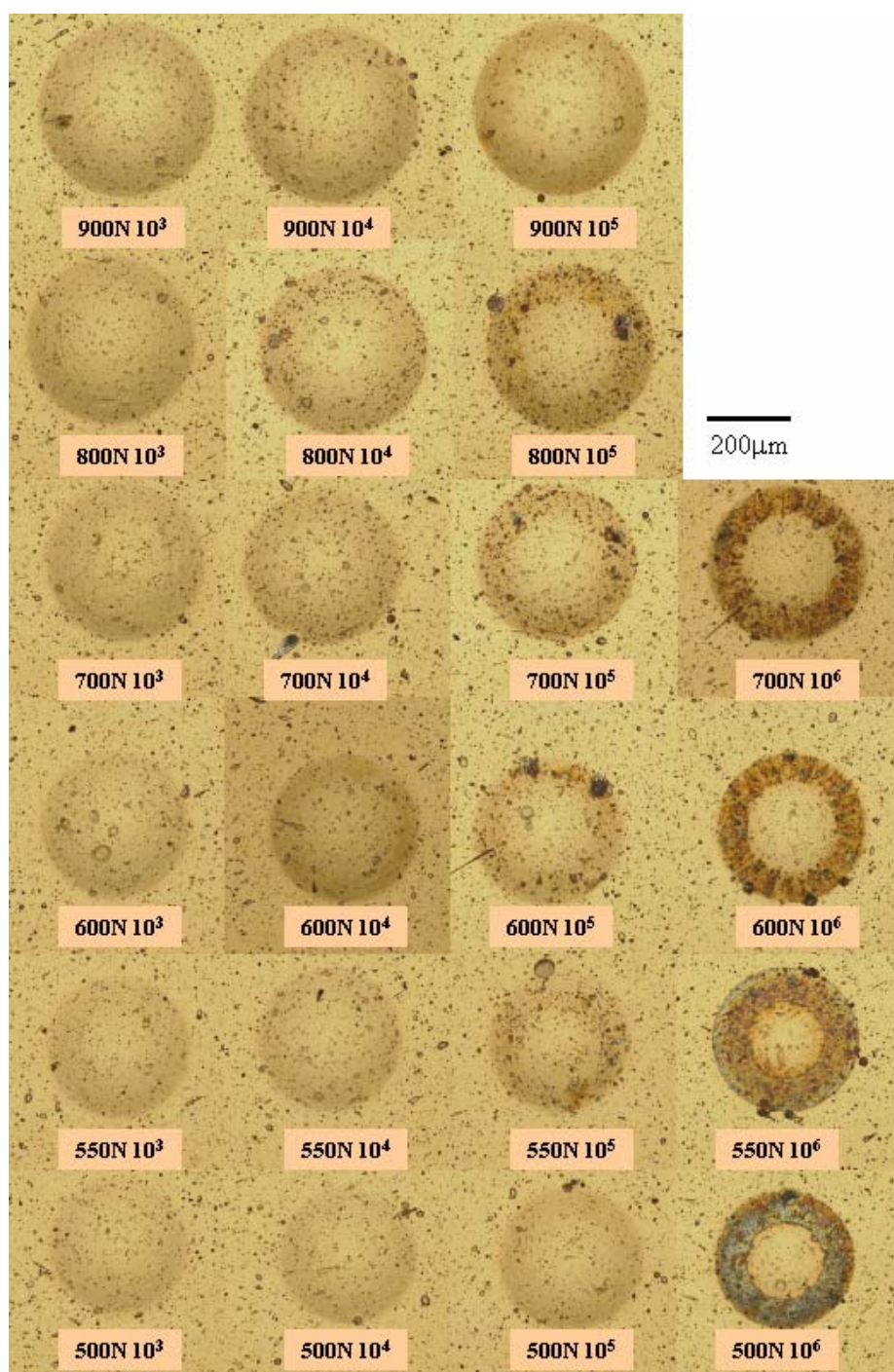


Figura 6.10. Huellas aparecidas en el recubrimiento del sistema HWS + TiN después de los ensayos de fatiga





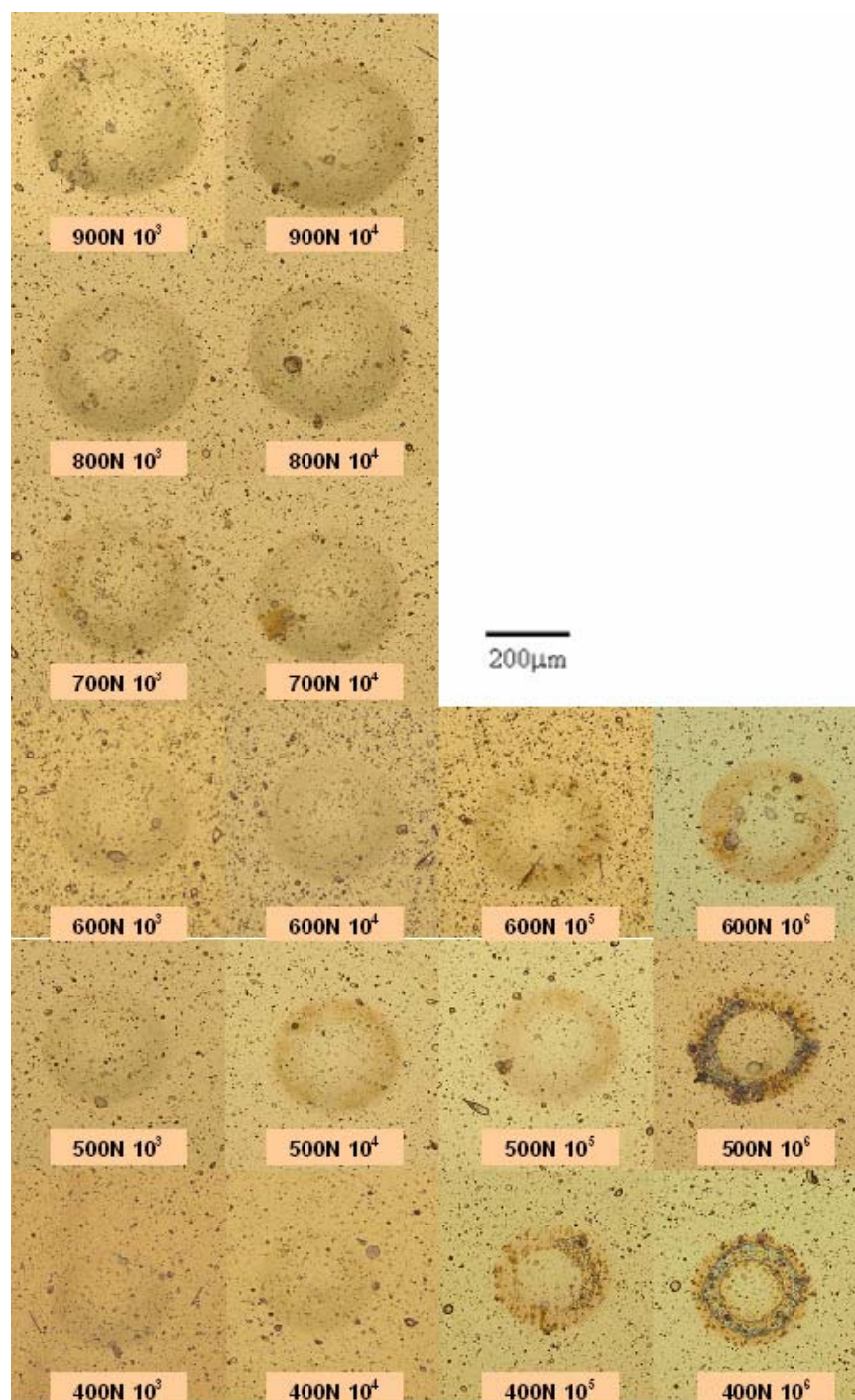


Figura 6.11. Huellas aparecidas en el recubrimiento después de los ensayos de fatiga



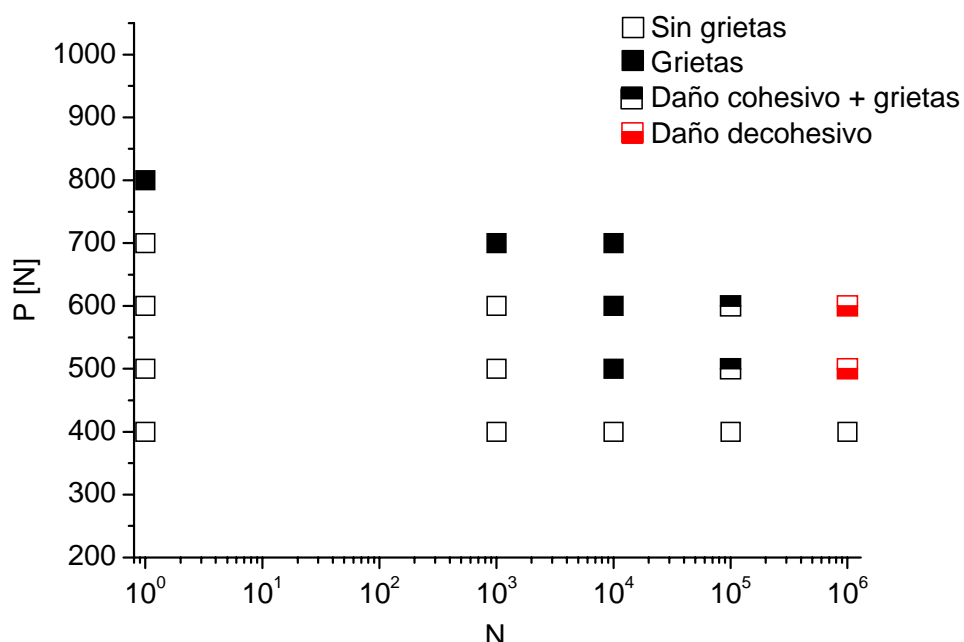


Figura 6.12. Curva P – N. Aparición del daño bajo cargas cíclicas para el sistema DIN 1.2379 + TiN.

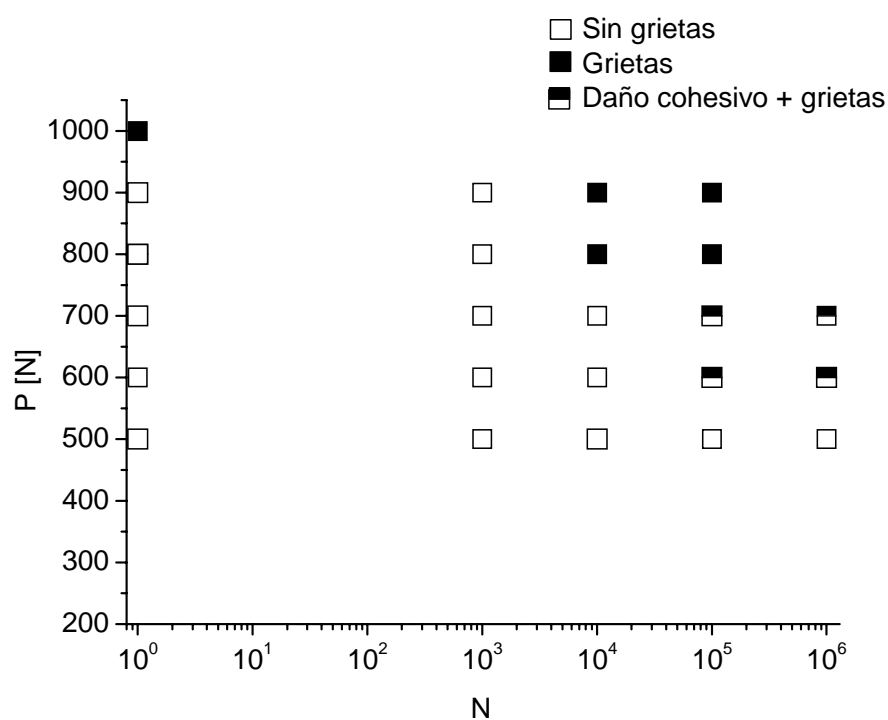


Figura 6.13. Curva P – N. Aparición del daño bajo cargas cíclicas para el sistema UNIVERSAL + TiN.



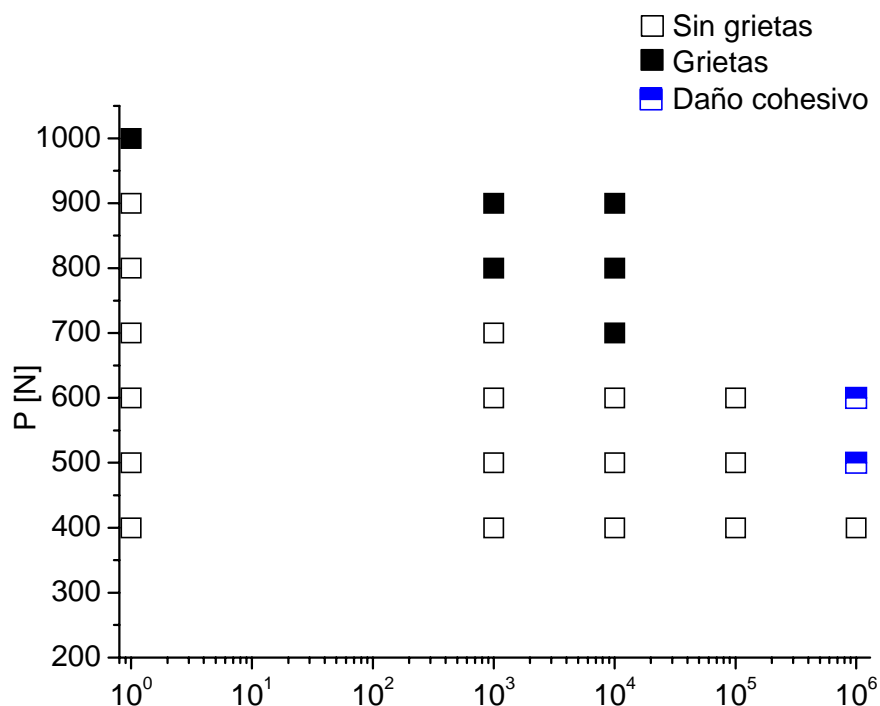


Figura 6.14. Curva P – N. Aparición del daño bajo cargas cíclicas para el sistema HWS + TiN

Sistema	Carga crítica para la aparición de grietas, $P_{f1}$ [N]	Presión crítica para la aparición de grietas, $p_{f1}$ [GPa]	Sensibilidad a fatiga para aparición de grietas, $p_{f1}/p_{c1}$
TiN + 1.2379	500	5,6	0,89
TiN + Universal	600	5,8	0,88
TiN + HWS	> 600	> 7,1	< 0,97

Tabla 6.5. Valores de carga crítica, presión crítica y sensibilidad a fatiga para la aparición de grietas en  $10^5$  ciclos.



Sistema	Carga crítica para la aparición de daño cohesivo, $P_{c2}$ [N]	Carga crítica para la aparición de daño cohesivo, $p_{c2}$ [GPa]	Carga crítica para aparición de daño cohesivo, $P_{f2}$ [N]	Presión crítica para aparición de daño cohesivo, $p_{f2}$ [GPa]	Sensibilidad a fatiga para aparición de spalling, $p_{f2}/p_{c2}$
TiN + 1.2379	> 2000 <sup>(3)</sup>	> 6,8	500	5,6	<0,82 <sup>(3)</sup>
TiN + Universal	> 2000 <sup>(3)</sup>	> 7,2	600	5,8	<0,80 <sup>(3)</sup>
TiN + HWS	> 2000 <sup>(3)</sup>	> 8	> 600	>7,1	<0,89 <sup>(3)</sup>

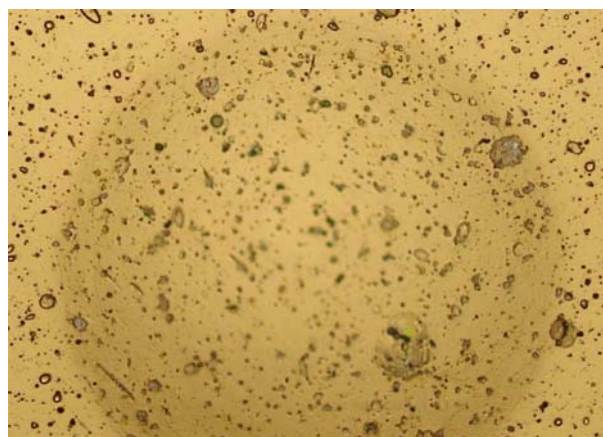
Tabla 6.6. Valores de carga crítica, presión crítica y sensibilidad a fatiga para la aparición fallo cohesivo o “spalling” en  $10^5$  ciclos<sup>(3)</sup>. No se observó daño cohesivo para cargas monotónicas por lo cual se asumen valores por encima de 2000 N para hacerlo comparativo entre los tres sistemas<sup>(3)</sup>.

Sistema	Carga crítica para la aparición de decohesión, $P_{c3}$ [N]	Presión crítica para la aparición de decohesión, $p_{c3}$ [GPa]	Carga crítica para daño decohesivo, $P_{f3}$ [N]	Presión crítica para daño decohesivo <sup>(1)</sup> , $p_{f3}$ [GPa]	Sensibilidad a fatiga para daño decohesivo, $p_{f3}/p_{c3}$
TiN + 1.2379	> 4000	> 8	500	5,6	<0,70 <sup>(2)</sup>
TiN + Universal	-	-	-	-	-
TiN + HWS	-	-	-	-	-

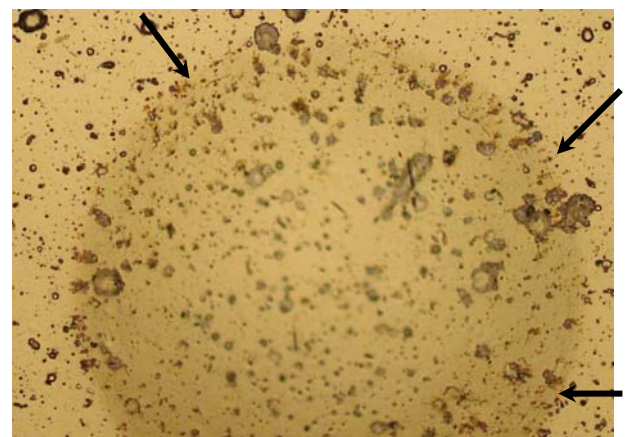
Tabla 6.7. Valores de carga crítica, presión crítica y sensibilidad a fatiga para la aparición fallo decohesivo o delaminación en  $10^6$  ciclos<sup>(1)</sup>. No se observó decohesión para cargas monotónicas por lo cual se asumen valores por encima de la carga más alta aplicada por indentación monotónica<sup>(2)</sup>.



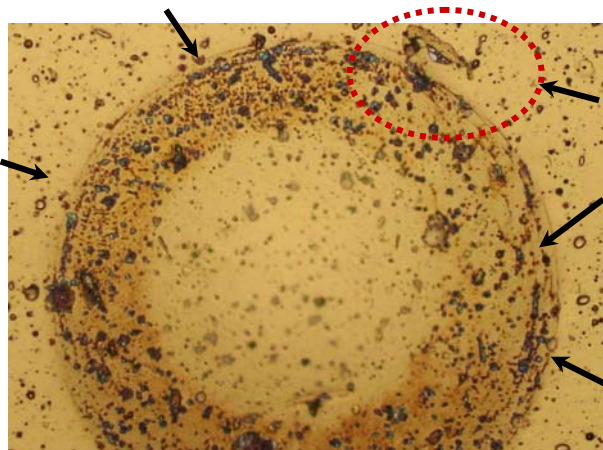




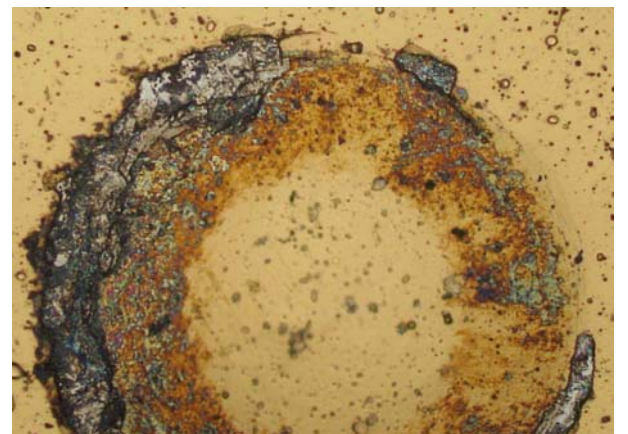
**600 N 10<sup>3</sup>**



**600 N 10<sup>4</sup>**

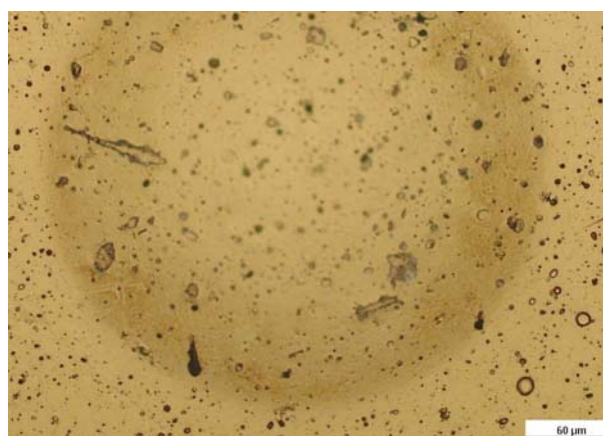


**600 N 10<sup>5</sup>**

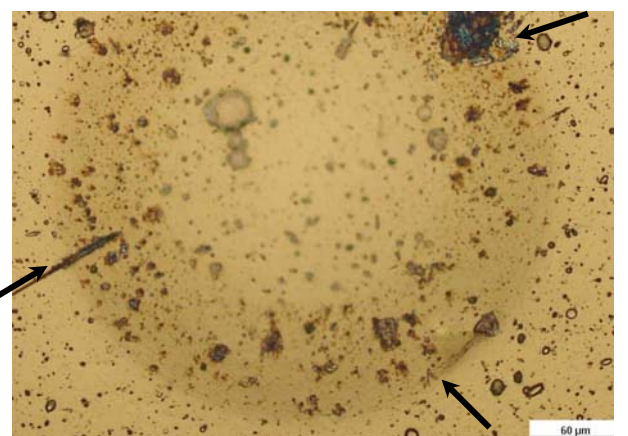


**600 N 10<sup>6</sup>**

Fig.6.15. Aparición de mecanismos de fallo en el sistema 1.2379 + TiN



**600 N 10<sup>4</sup>**



**600 N 10<sup>5</sup>**





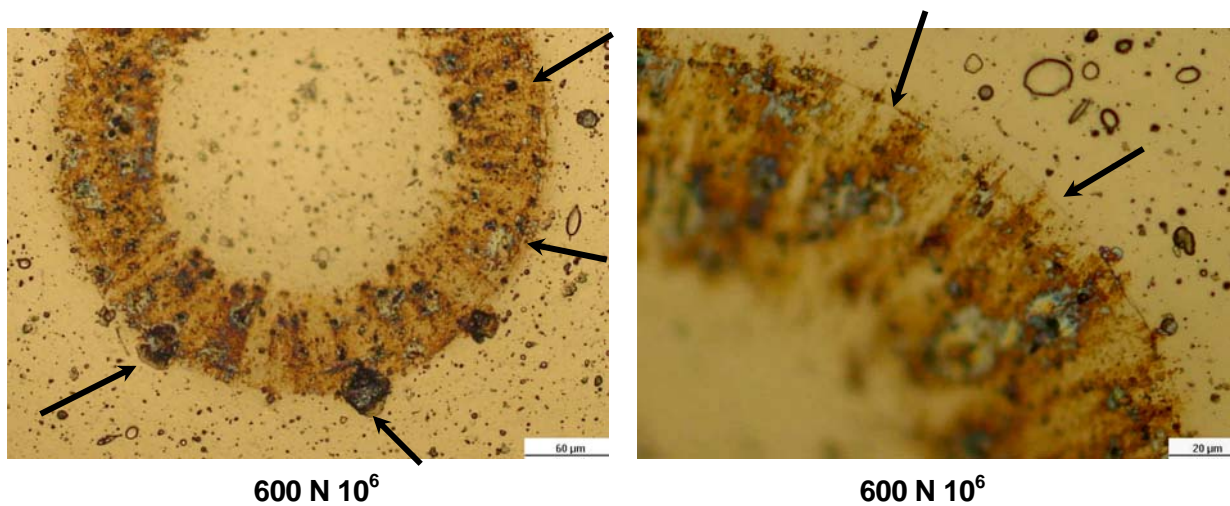


Fig.6.16. Aparición de mecanismos de fallo en el sistema UNIVERSAL + TiN

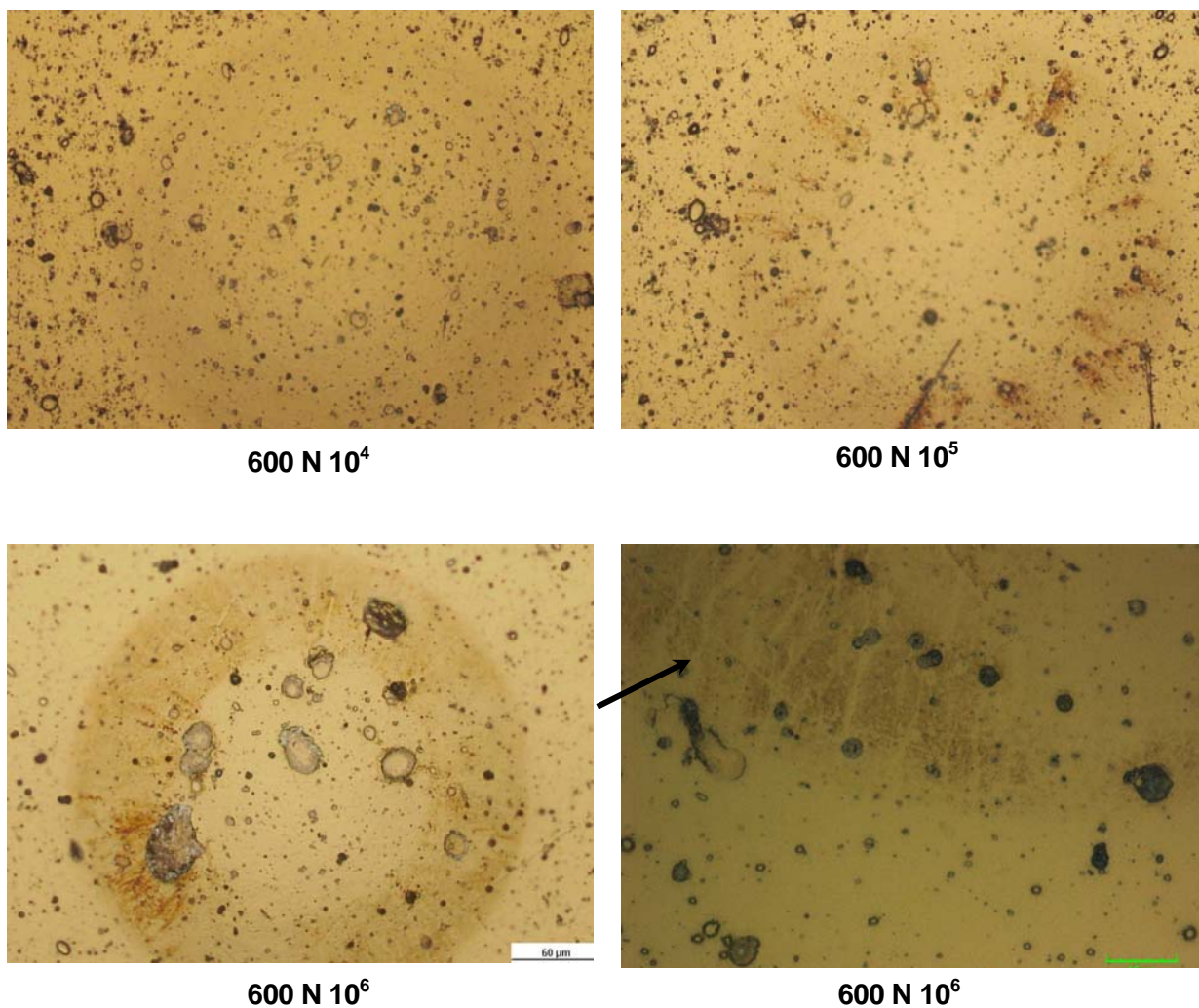


Fig.6.17. Aparición de mecanismos de fallo en el sistema HWS + TiN



Una parte fundamental de este trabajo fue analizar la fatiga por contacto en términos de la presión generada por la aplicación de una carga puntual, con el fin de discriminar posteriormente las respuestas mecánicas entre los diferentes sistemas sustrato-recubrimiento. Consecuentemente, se estimó la máxima presión para la aparición de daño,  $p_{0,max}$ , asociada a cada huella producida para los valores de carga y número de ciclos evaluados. Ésta se obtuvo a través de la medición de las huellas resultantes del contacto cíclico sobre cada una de las muestras estudiadas y mediante la ecuación 6.4 se calculó  $p_{0,max}$ .

$$(p_{0,max})_{Ni} = \frac{\left(\frac{P_{max}}{\pi a^2}\right)_{Ni-1} + \left(\frac{P_{max}}{\pi a^2}\right)_{Ni}}{2}, \quad (\text{Ec. 6.4})$$

con  $N_i = 1, 10^3, 10^4, 10^5$  y  $10^6$  ciclos, para  $i = 1, 2, \dots, 5$

Los valores correspondientes a cada sistema y según el mecanismo de fallo se han mostrado anteriormente en las tablas 6.4, 6.5 y 6.6. Asimismo, en dichas tablas, se muestran los cocientes entre el límite a fatiga y el límite monotónico ( $p_f/p_c$ ) que se establecieron como un parámetro de evaluación de la sensibilidad a fatiga. Los resultados muestran valores cercanos a la unidad, lo que indica una sensibilidad relativamente baja, al menos en términos de presión, a la aplicación de cargas variables en los aceros recubiertos con TiN. Una posible razón para estos resultados podría asociarse a la naturaleza cerámica del recubrimiento [16]-[18], especialmente si se consideran los esfuerzos compresivos residuales elevados exhibidos asociados al proceso de deposición física por vapor [19].

Posteriormente, se generaron las gráficas de  $P_0$ -N (véase la figura 6.18, 6.20 y 6.20) donde se observa una relación inversa entre ambos parámetros, es decir, la aparición de grietas se produce a mediada que disminuye la presión y aumenta el número de ciclos. Normalmente, la aparición de grietas circunferenciales precede al daño cohesivo (spalling), como ocurrió con los sistemas TiN + 1.2379 y TiN + Universal. Dichas grietas están dispuestas alrededor de la huella residual y, de acuerdo con la teoría de Hertz, existe una zona de alta resistencia a la tracción donde ocurre el fallo del recubrimiento como ha sido apuntado por la literatura existente [14].

Evaluando los resultados obtenidos, se aprecia que el acero HWS recubierto con TiN mostró la mejor respuesta mecánica a la fatiga por contacto, desde el punto de vista de aparición de grietas, incluso la presión para la aparición de daño cohesivo ( $p_{f2}$ ) de este sistema parece no estar asociado con la aparición previa de grietas circunferenciales en el recubrimiento, pues para un número de ciclos previo a la aparición de “spalling” no aparecen grietas en la periferia de la huella, como se puede observar en la Figura 6.17. Este fenómeno puede indicar que un posible origen del fallo esté dentro del recubrimiento, dando lugar a una



propagación de grieta dentro de las columnas de TiN, tal y como se describe en estudios previos [9], pero es indispensable recurrir a otras técnicas de caracterización, p.e. FIB (Focused Ion Beam), para poder describir detalladamente este proceso.

Finalmente, es importante mencionar que la mejor respuesta del sistema TiN + HWS se puede atribuir a la mayor dureza del sustrato o bien a su microestructura, es decir, el acero pulvimetalurgico HWS contiene carburos más pequeños y mejor distribuidos pudiendo implicar una mejor transferencia de carga en el sistema, así como una menor probabilidad de fisurar a los carburos. No obstante, se sugiere realizar un estudio adicional teniendo un acero HWS con dureza semejante a los sustratos 1.2379 y Universal para eliminar el efecto de este parámetro y observar si se presentan los mismos mecanismos de daño.

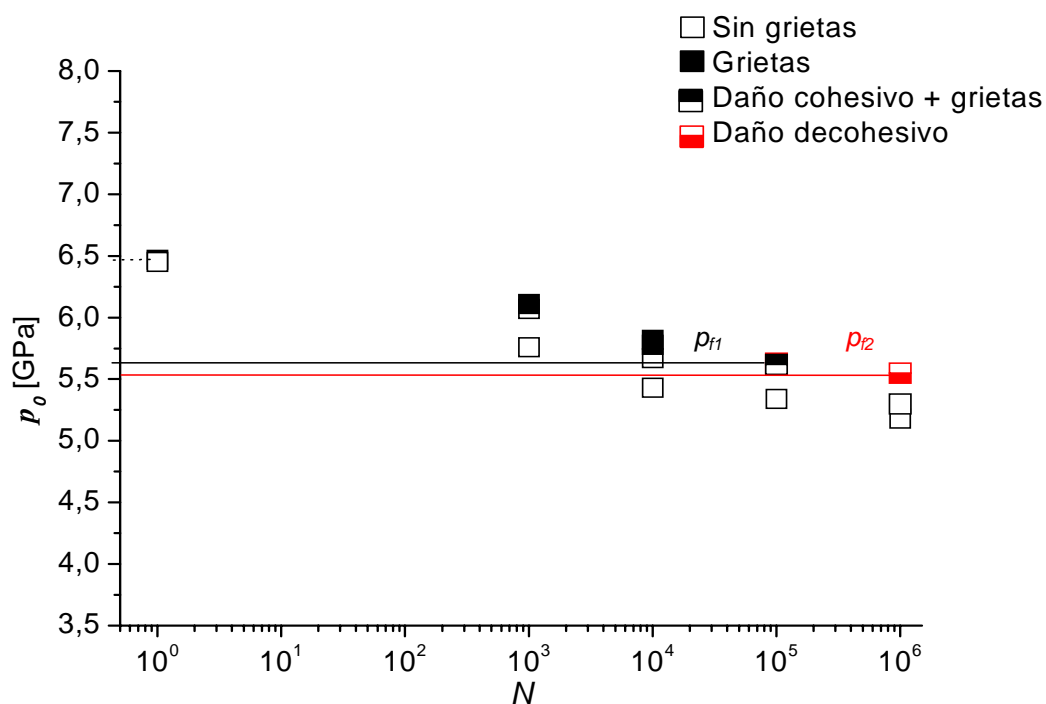
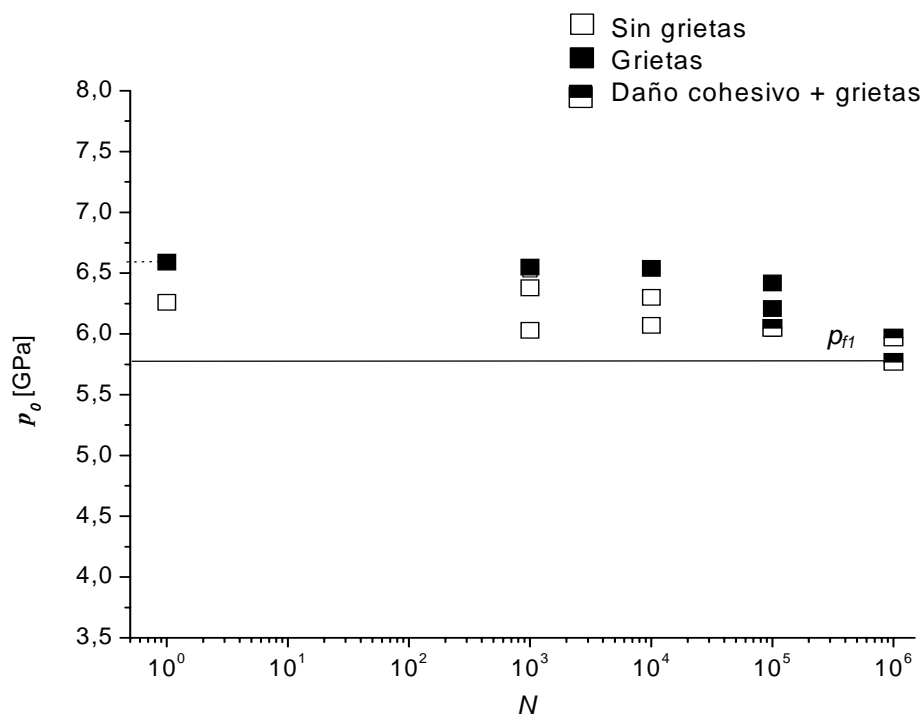
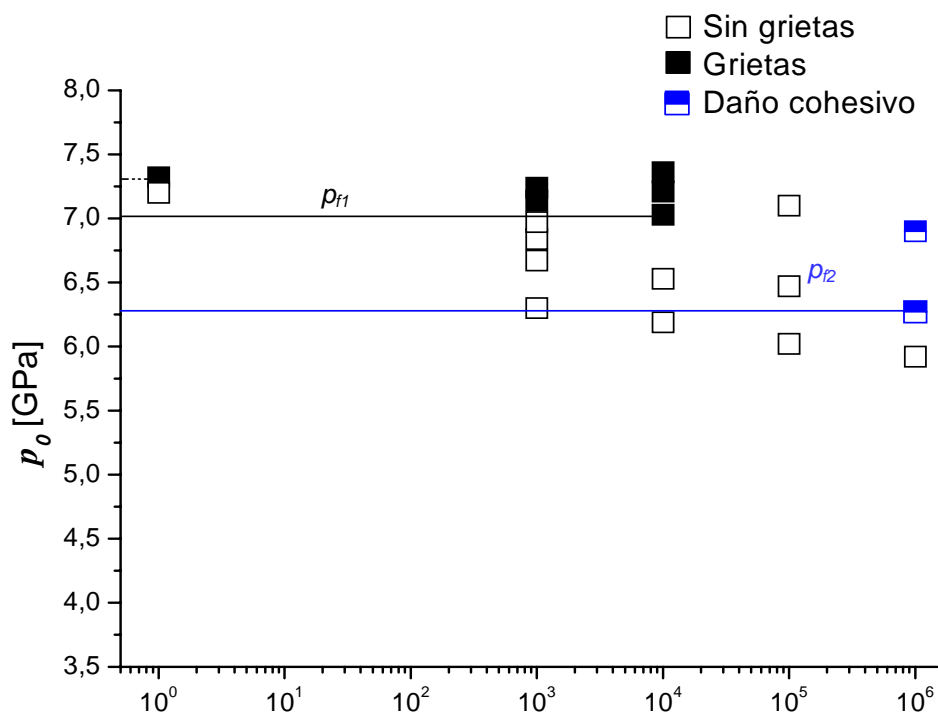


Fig.6.18. Curva  $p_0$  vs.  $N$ . Sistema 1.2379 + TiN





Figura 6.20. Curva  $p_0$  vs.  $N$ . Sistema UNIVERSAL + TiNFig. 6.19. Curva  $p_0$  vs.  $N$ . Sistema HWS + TiN

## 6.4. ANÁLISIS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Los ensayos en la sección transversal permitieron analizar el daño que sufre el sustrato al someter a la superficie a un esfuerzo monotónico o de fatiga. La inspección mediante microscopía óptica reveló las indentaciones tanto en vista superficial como en sección transversal. Adicionalmente, se tomaron micrografías mediante microscopía confocal para un análisis en mayor profundidad del daño generado.

En las figuras 6.21, 6.22 y 6.23 se muestra el comportamiento de cada uno de los sistemas estudiados bajo indentación monotónica y cíclica. Se puede observar el efecto de la fatiga, es decir, se aprecia un aumento del daño cuasi-plástico y de la deformación plástica a medida que se aumenta el número de ciclos.

De acuerdo con la literatura existente, se puede determinar que, por encima de una carga crítica, los recubrimientos se deforman por cizalla de éstos sobre el sustrato. De manera que las columnas se deslizan verticalmente bajo la acción de un esfuerzo de cizalla y se crea un desplazamiento global del sistema sustrato-recubrimiento que puede traducirse en grietas [9].

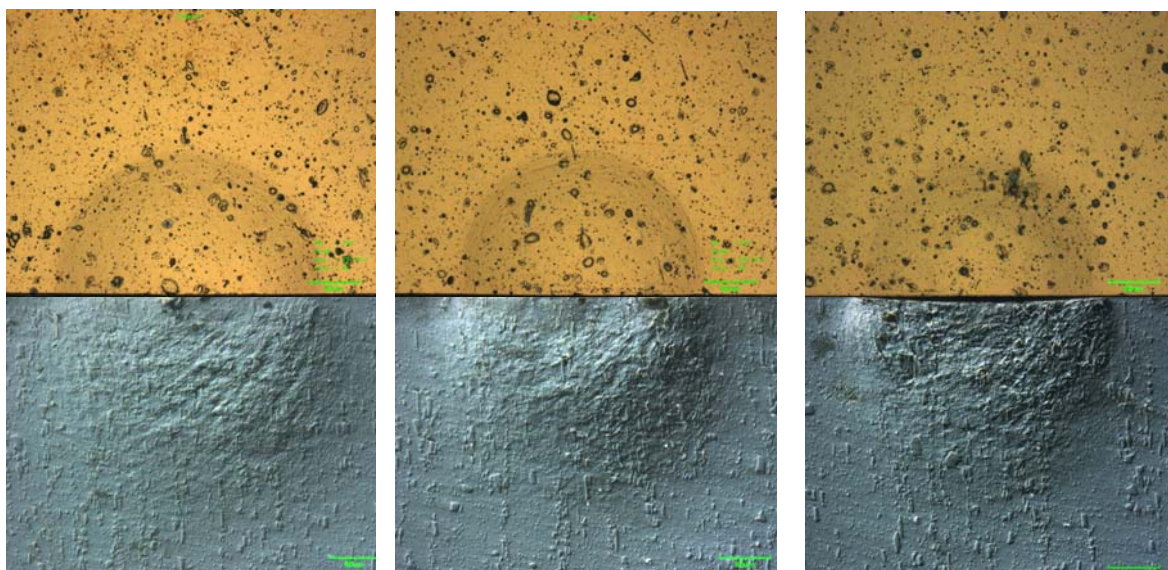


Fig.6.21 Daño generado en profundidad en el sistema DIN 1.2379 + TiN por contacto esférico, siendo la parte superior de la fotografía la superficie y la inferior, la intercara. a) 900 N, b) 700N –  $10^4$  ciclos y c) 700N –  $10^5$ .



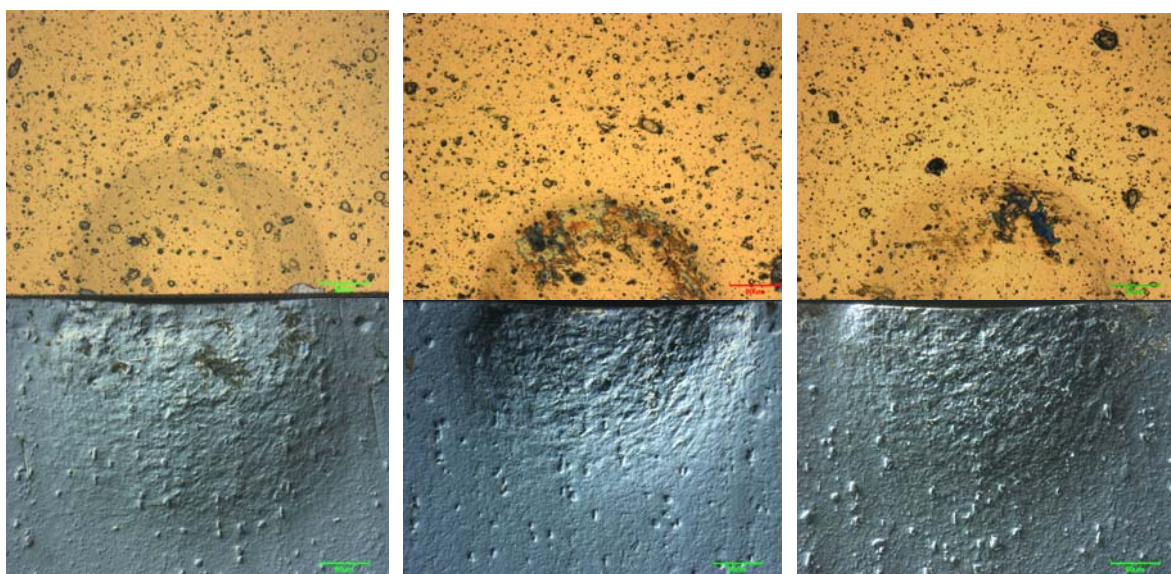


Fig.6.22. Daño generado en profundidad en el sistema UNIVERSAL + TiN por contacto esférico, siendo la parte superior de la fotografía la superficie y la inferior, la intercara. a) 900 N, b) 700N –  $10^4$  ciclos y c) 700N –  $10^5$ .

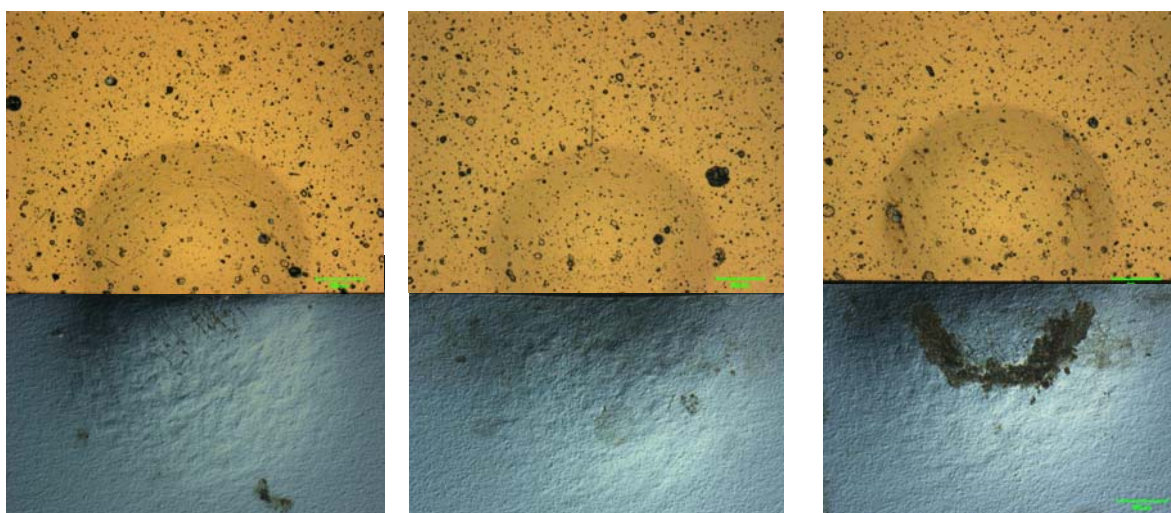


Fig.6.23. Daño generado en profundidad en el sistema HWS + TiN por contacto esférico, siendo la parte superior de la fotografía la superficie y la inferior, la intercara. a) 900 N, b) 700N –  $10^4$  ciclos y c) 700N –  $10^5$ .





## 7. CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto ha sido llevar a cabo una serie de ensayos de contacto esférico con el fin de elaborar un estudio sobre el comportamiento mecánico de tres sistemas de aceros recubiertos para ser usados como aceros de herramienta para trabajo en frío.

Los resultados obtenidos después de la finalización del presente proyecto se presentan a continuación:

- La respuesta mecánica al contacto, obtenida mediante indentación esférica bajo sollicitación mecánica, es muy similar para todos los sistemas sustrato-recubrimiento estudiados. Por lo tanto la presencia del recubrimiento no afecta a la respuesta al contacto del sustrato como ente individual.
- La cedencia plástica de los tres sistemas sustrato-recubrimiento estudiados es un requisito indispensable para la aparición de grietas circulares en el recubrimiento.
- La aplicación de una carga cíclica por indentación ha permitido discernir las diferentes respuestas mecánicas en los sistemas sustrato-recubrimiento.
- La sensibilidad a fatiga es relativamente baja para los sistemas evaluados, lo cual puede atribuirse al carácter cerámico del TiN.
- El acero HWS mostró mejor respuesta mecánica teniendo en cuenta que el recubrimiento fue el mismo.
- Los sistemas estudiados se ven afectados por el efecto de la fatiga, es decir, se aprecia un aumento del daño cuasi-plástico y de la deformación plástica a medida que se aumenta el número de ciclos.







## 8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, querría agradecer a mi director de proyecto Luís M. Llanes, por todo el apoyo y ayuda que me ha proporcionado durante estos meses de trabajo, así como la ayuda que también me ha prestado Giselle Ramírez.

Por otro lado, querría mostrar mi agradecimiento por la amabilidad y paciencia de todos los técnicos del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. En particular, quiero destacar la ayuda ofrecida por el Sr. Francesc Heredero.

Finalmente, un agradecimiento muy especial a mi familia y amigos que me han dado todo su apoyo para que llegara el momento de escribir estas líneas.

A todos, muchas gracias.

Raquel Caballero







## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RAMÍREZ, G., TARRÉS, E., CASAS, B., VALLS, I., MARTÍNEZ, R. Y LLANES, L. *Respuesta mecánica bajo solicitaciones de contacto en aceros recubiertos*.
- [2] MARTÍNEZ BAENA, M.A. Y PALACIOS, J.M. *Algunas consideraciones sobre los aceros de herramientas, su utilización y tratamiento térmico Capítulo V: Aceros aleados de herramientas para trabajos en frío*. Tratamientos Térmicos. Madrid Junio 2006. p. 34-40.
- [3] ROVALMA. Catálogo de aceros para trabajo en frío: UNIVERSAL  
  
[<http://www.rovalma.com/PDF/Catalogos/Sp/Cataleg-UNIVERSAL.pdf>, 3 de Març de 2008]
- [4] ROVALMA. Catálogo de aceros para trabajo en frío: HWS  
  
[<http://www.rovalma.com/PDF/Catalogos/Sp/Cataleg-HWS%20ISOTROPIC.pdf>, 3 de Març de 2008]
- [5] HÖGMARK, S; JACOBSSON, S Y LARSSON, M. *Wear*. 246, (2000), p. 20-33.
- [6] OLIVER, W.C. Y PHARR, G.M. *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. J. Mater. Re. Vol. 7, No. 6, Junio 1992, p. 1564-1583.
- [7] KERN, W. *Thin film process II*. 1991.
- [8] TTC RECUBRIMIENTOS. Catálogo PVD Deposición física en fase vapor.
- [9] JAYARAM, V; BHOWMICK, S; XIE, Z.H; MATH, S; HOFFMAN, M Y BISWAS, S.K. *Contact deformation of TiN coatings on metallic substrates*. Mater. Sci. Eng. 423, 2006, p. 8-13.
- [10] STOIBER, M; PANZENBÖCK, M; MITTERER, C Y LUGMAIR, C. *Faigue properties of Ti-based hard coatings deposited onto tool steels*. Surf. Coat. Technol. 142–144, 2001, p. 117-124.
- [11] BANTLE, R. Y MATTHEWS, A. *Investigation into the impact wear behaviour of ceramics coatings*. Surf. Coat. Technol. 74–75, 1995, p. 857-868.



- [12] LAWN, B.R. *Indentation of Ceramics with Spheres: A Century after Hertz*. J. Am. Ceram. Soc. 81 [8], 1977-94, 1998.
- [13] SEUNG KUN LEE,\*, SATAPORN WUTTIPHAN Y LAWN, B.R. *Role of Microstructure in Hertzian Contact Damage in Silicon Nitride: I, Mechanical Characterization*. J. Am. Ceram. Soc., 80 [9], 2367-81, 1997.
- [14] KNOTEK, O., BOSSERHOFF, B., SCHREY, A., LEYENDECKER, T., LEMMER, O. Y ESSER, S. *A new technique for testing the impact load of thin films: the coating impact test*. Surf. Coat. Technol. 1992.
- [15] LANGITAN, F.B. Y LAWN, B.R. *Hertzian Fracture Experiments on Abraded Glass Surfaces as Definitive Evidence for an Energy Balance Explanation of Auerbach's Law*. J. Appl. Phys., 40[10] 4009-17 (1969).
- [16] FLECK, N.A., KANG, K.J. Y ASHBY, M.F. *The Cyclic Properties of Engineered Materials*. Acta Metall. Mater. 1994, Vol. 42, 365-381.
- [17] SURESH, S. *Fatigue of Materials*. Second Edition, 1998. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [18] RITCHIE, R.O. *Mechanisms of Fatigue-Crack Propagation in Ductile and Brittle Solids*. Int. J. Fracture, 1999, Vol. 100, pp. 55-83.
- [19] BERMEJO, R., TORRES, Y., ANGLADA, M. Y LLANES, L. *Fatigue Behaviour of Alumina-Zirconia Multilayered Ceramics*. J. Am. Ceram. Soc. 2008, doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02336.x.
- [20] BATISTA, J.C.A., GODOY, C., PINTAÚDE, G., SINATORA, A. Y MATTHEWS, A. *An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests*. Surf. Coat. Technol. 2003, 174-175, p. 891-898.
- [21] LUGSCHEIDER, E., KNOTEK, O., WOLFF, C. Y BÄRWULF, S. *Structure and properties of PVD-coatings by means of impact tester*. Surf. Coat. Technol. 1999, 116-119, p. 141-146
- [22] BOUZAKIS, K.D., VIDAKIS, N. Y DAVID, K., *The concept of an advanced impact tester supported by evaluation software for the fatigue strength characterization of hard layered media*. Thin Solid Films. 1999, 355-356, p. 322-329
- [23] JUNG, Y.G., WUTTIPHAN, S., PETERSON, I.M. Y LAWN, B.R. *J. Dent. Res.* 1999, 78, p. 887-97



**[24]** JOHNSON, K.L., *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985





## ANEXOS

### A PRESUPUESTO

El presente estudio se basa en el trabajo continuado de una persona durante 5 meses, con soporte de diversos profesores, doctorandos y técnicos. Se ha desarrollado en el seno del Centro de Integridad Estructural y Fiabilidad de Materiales (CIEFMA) y, en concreto, en el Laboratorio de Fractura y Fatiga de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB), perteneciente a la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Para su realización se han utilizado diferentes máquinas de ensayos, preparación y observación, disponibles en el citado laboratorio.

Las tareas básicas de esta investigación han sido la preparación metalográfica de las diferentes probetas a estudiar, los ensayos bajo contacto monotónico y cíclico, observación y medición de probetas mediante diferentes técnicas de microscopía y el trabajo de investigación y análisis de resultados por parte de personal cualificado.

En base a lo expuesto anteriormente, el presupuesto de este proyecto se estructura según tres conceptos base: la amortización de las máquinas utilizadas, el gasto asociado al material de laboratorio necesario para todas las tareas de investigación y los honorarios del personal involucrado en la realización del proyecto.

En cuanto al personal especializado se ha estimado en tiempo su participación:

- La intervención del profesor tutor en forma de reuniones ha sido de aproximadamente 3 horas al mes. A nivel de honorarios se considerará al tutor como Ingeniero Jefe de Proyecto.
- La intervención de los doctorandos se estima en aproximadamente de 35 horas al mes. A nivel de honorarios se considerará al doctorando como Ingeniero Senior.
- El trabajo realizado por el autor del presente proyecto se estima en aproximadamente 100h cada mes. Los honorarios serán calculador en base a un Ingeniero Júnior.
- El uso de todos los instrumentos y máquinas de ensayo necesitan el soporte de personal competente. La intervención de técnicos es imprescindible en el correcto uso de las diferentes máquinas y al buen funcionamiento del laboratorio. Se estima la intervención de los técnicos de laboratorio en 10 horas al mes.



En la tabla A.1 se desglosa el coste de cada uno de los conceptos que intervienen en el proyecto.

Concepto	Coste unitario	Cantidad	Subtotal
<b>Costes de amortización de la maquinaria</b>			
Pulidoras manuales ECOMET-4 de BUELHER	10 €/h	30h	300 €
Máquina de corte ACCUTOM-50 de STRUERS	25 €/h	1h	25
Encastadora LABOPRESS-3 de STRUERS	10 €/h	2h	20 €
Máquina de ensayos INSTRON 8511	40 €/h	300 h	12. 000 €
Microscopía óptica	20 €/h	25 h	500 €
Microscopía SEM	50 €/h	6 h	300 €
Confocal	50 €/h	4h	200 €
SUBTOTAL			13.345 €
<b>Material de laboratorio</b>			
Paño para la preparación metalográfica, 6 µm	100 €/ud	1 ud.	100 €
Paño para la preparación metalográfica, 3 µm	100 €/ud	1 ud	100 €
Paño de sílice coloidal	200 €/h	1 ud	200 €
Discos de desbaste	50 €/ud	3 ud	150 €
Pasta de diamante, 6 µm	60 €/l	0,25 l	15 €
Pasta de diamante, 3 µm	300 €/l	0,25 l	75 €
Lubricante	50 €/l	0,5 l	25 €
Disolventes	2 €/l	2 l	4 €
Bolas indentación	2 €/ud	20 ud	40 €



Disco de corte de diamante	650 €/ud	1 ud	650 €
Resina encaste	75 €/kg	0,2 kg	15 €
SUBTOTAL			1.374 €
<b>Honorarios personal especializado (periodo: 5 meses)</b>			
Ingeniero Júnior	12 €/h	500 h	6.000 €
Ingeniero Senior	30 €/h	175 h	5.250 €
Jefe de proyecto	60 €/h	15 h	900 €
Técnicos de laboratorio	25 €/h	50 h	1.250 €
SUBTOTAL			13.400€
<b>TOTAL PROYECTO</b>			<b>28.119 €</b>

Tabla A.1. Presupuesto del proyecto de investigación







## B ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL

De acuerdo con las tareas básicas de este proyecto descritas en el anexo A, la valoración del impacto ambiental asociado a esta investigación se limitará al consumo de energía vinculado a la utilización de las diferentes máquinas de preparación y ensayo, a los materiales de las probetas y al tratamiento de los residuos derivados del uso del material de laboratorio necesario para la preparación de las muestras a analizar.

Es necesario indicar que el laboratorio está instalado en un sótano lo que provoca la utilización ininterrumpida de energía para iluminar las instalaciones. El consumo de energía asociado al uso de las máquinas se optimizó mediante la planificación para reducir al máximo los procedimientos y ensayos suplementarios o innecesarios. Sin embargo, el contacto por fatiga requiere ensayos muy prolongados en el tiempo necesitando muchas horas de funcionamiento y, por consiguiente, un gran consumo de energía.

Las probetas que han sido utilizadas para la realización de los ensayos han sido un número muy reducido. Asimismo, una de las ventajas de la mecánica de contacto hertziana es la de necesitar muestras muy pequeñas en la experimentación. Esto se traduce en muy poco material usado, por lo que por un lado supondrá menor cantidad de residuos y, por otro, ha supuesto un menor consumo de energía y de emisiones de CO<sub>2</sub> en su obtención y fabricación.

Las operaciones de preparación metalográfica de las muestras requieren varios pasos, utilizando máquinas de pulido y diferentes accesorios. Con el fin de obtener el acabado deseado se emplean diferentes discos de desbaste, paños de pulido, lubricantes y pasta de diamante de calidades cada vez más finas. Tras la utilización de cada paño, estos son limpiados con agua. Las aguas sucias de pulido con partículas residuales de la probeta, pasta de diamante y lubricante, se filtran mediante tamices. Sin embargo, los productos como el lubricante y las partículas de tamaño micrométrico no son filtrados y pasan a las canalizaciones.

En la preparación de las probetas se realizaron, en ciertos casos, procesos de corte. Para evitar calentamiento de los discos de corte, las máquinas disponen de lubricación. Una vez retirados estos lubricantes se vierten sobre recipientes destinados a tal efecto, de manera que no se mezclen con otras sustancias y puedan ser objeto del tratamiento adecuado.

Por otra parte, los desechos procedentes del encastado de las probetas se depositan en los recipientes de residuos generales, lo que impide una optimización del tratamiento de dichos desechos.



Para la limpieza de las diferentes probetas, se utilizan productos químicos como acetona y etanol que después de su uso, se introducen en unos determinados envases para su posterior reciclaje.



